

Universitat Politècnica de Catalunya
Escola Superior d'Enginyeria Industrial de Barcelona

TREBALL FI DE GRAU



UNIVERSITAT POLITÈCNICA DE CATALUNYA
BARCELONATECH

Escola Tècnica Superior d'Enginyeria
Industrial de Barcelona



Dal Noguer Hidalgo

Nou disseny i anàlisi de l'element d'absorció d'impacte d'un cotxe Formula Student

Departament de Resistència de Materials i Estructures a l'Enginyeria

Directors: Prof. Dr. F. Roure
Prof. Dr. M. Ferrer

Grau: Grau Enginyeria Tecnologies Industrials

Abstracte

El present treball té com a principal objectiu analitzar la funcionalitat d'un atenuador d'impactes emprat en un cotxe Formula Student, a través de l'anàlisi de l'impacte utilitzant el Mètode dels Elements Finites (FEM). La funcionalitat queda establerta en la normativa anual 2016 publicada per la SAE International (*Society of Automotive Engineers*), en referència a la categoria Formula Student.

En segon lloc, es vol optimitzar aquest element en quant a la lleugeresa. Per tant, s'analitzaran nous dissenys d'atenuadors d'impactes, que combinaran innovacions en quant a la geometria i al material absorbidor d'energia. En aquest treball s'estudiarà en concret la resina reforçada amb fibra de vidre, un material compost que presenta millors propietats mecàniques que l'alumini, a la vegada que és més lleuger.

Finalment, aquest treball no pretén ser només d'utilitat en el cas concret de disseny d'un atenuador d'impactes en un cotxe Formula Student, sinó que pot servir d'utilitat com a guia per realitzar qualsevol tipus d'anàlisi d'impactes utilitzant el Mètode dels Elements Finites (FEM). A més, degut a les necessitats que han sorgit durant l'elaboració del treball, també serveix com a guia per analitzar el comportament a vinclament de qualsevol estructura. A l'annex es troben els codis emprats per totes les simulacions, que poden ser de gran ajuda per aquell qui necessiti realitzar un anàlisi semblant.

Índex

1. Introducció i Objectius.....	1
2. Consistència d'unitats.....	2
3. Anàlisi model actual	3
3.1. Geometria	3
3.2. Materials	3
3.2.1. Alumini	3
3.2.2. Estructura Honeycomb	4
3.3. Tipus d'elements	6
3.4. Mallat	6
3.4.1. Dimensionat per línies.....	7
3.4.2. Atributs dels elements.....	7
3.5. Contactes.....	8
3.5.1. Contacte massa - estructura honeycomb.....	8
3.5.2. Contacte estructura honeycomb - placa de fixació.....	8
3.6. Condicions de contorn i condicions inicials	9
3.7. Tipus d'anàlisi i Controls	10
3.8. Anàlisi de resultats.....	11
3.8.1. Determinació del final de l'impacte.....	11
3.8.2. Criteri de resistència i rigidesa de la placa de fixació	12
3.8.3. Acceleració de la massa.....	13
4. Primer disseny.....	14
4.1. Geometria.....	15
4.2. Materials	16
4.2.1. Alumini	16
4.2.2. Material Compost.....	16
4.3. Condicions del model i la simulació	17
4.4. Anàlisi de resultats.....	18
4.4.1. Gruix de 10 mm	18
4.4.2. Gruix de 8 mm	19
4.4.3. Gruix de 6 mm.....	21
4.4.4. Gruix de 4 mm.....	22
4.4.5. Gruix de 2 mm.....	23
4.4.6. Gruix de 1 mm	24
4.4.7. Comparació de perfils de velocitats i acceleracions	25
5. Segon disseny.....	27
5.1. Anàlisi de vinclament	27
5.1.1. Condicions de contorn	28
5.1.1. Determinació gruix mínim.....	29

5.1. Anàlisi de l'impacte	29
6. Futurs dissenys	32
6.1. Proposta per al següent disseny	32
7. Conclusions.....	33
8. Bibliografia	34
ANNEX.....	35
Simulacions.....	36

1. Introducció i Objectius

El principal objectiu d'aquest treball és optimitzar l'element atenuador d'impactes implementat al cotxe Formula Student que dissenya l'equip ETSEIB Motorsport, de la Universitat Politècnica de Catalunya. La funció objectiu a optimitzar és el pes total de l'estructura.

L'element absorbidor d'impactes presenta dos estructures separades: en primer lloc, una estructura conformada amb un material que presenti bones propietats mecàniques a l'hora d'absorbir energia en un impacte; i en segon lloc, una placa d'alumini que uneixi el xassís del cotxe amb l'estructura absorbidora d'energia.

L'estructura a optimitzar serà l'absorbidora d'energia, ja que la placa d'alumini es invariant degut a dos factors: en primer lloc, el contorn de la placa d'alumini ve limitat per la geometria facilitada per el equip encarregat de dissenyar el xassís; i en segon lloc, la normativa publicada per a l'any 2016 per a la categoria Formula Student per la SAE estableix un gruix de 4 mm per a la placa d'alumini.

D'aquesta manera, s'analitzarà la funcionalitat de l'absorbidor d'impactes actual, que utilitza alumini amb una estructura *honeycomb*, i posteriorment es buscarà una geometria que compleixi els requeriments, però que en comptes d'alumini utilitzi resina reforçada amb fibra de carboni, un material més lleuger i amb millors propietats mecàniques a l'hora d'absorbir energia en un impacte.

Finalment, els requeriments que ha de complir l'element absorbidor d'energia en l'impacte són els següents:

1. La placa d'alumini pot deformar-se un màxim de 25,4 mm, per tal d'evitar que un impacte pugui causar danys al pilot.
2. Les acceleracions màxima i mitjana han de ser inferiors a 40g i 20g respectivament, per tal de protegir al pilot d'acceleracions que siguin perilloses per la seva integritat.

2. Consistència d'unitats

El programari utilitzat és ANSYS 15.0, concretament el paquet Mechanical APDL 15.0. A l'hora d'introduir dades i llegir els resultats, s'ha de tenir en compte la consistència d'aquestes unitats, ja que el programa en si mateix no les interpreta. A la següent taula es poden observar les diverses opcions de les quals es disposa, per tal de mantenir coherència en les unitats.

Property or Load	Unit System as classified by the ANSYS command /UNITS				
	SI	CGS	MPA	BFT	BIN
Mass	[kg]	[g]	[tonne]	[slug]	$\frac{[\text{lbf}][\text{sec}]^2}{[\text{in}]}$
Length	[m]	[cm]	[mm]	[ft]	[in]
Time	[s]	[s]	[s]	[sec]	[sec]
Temperature	[K]	[K]	[K]	[°R]	[°R]
Velocity	$\frac{[\text{m}]}{[\text{s}]}$	$\frac{[\text{cm}]}{[\text{s}]}$	$\frac{[\text{mm}]}{[\text{s}]}$	$\frac{[\text{ft}]}{[\text{sec}]}$	$\frac{[\text{in}]}{[\text{sec}]}$
Acceleration	$\frac{[\text{m}]}{[\text{s}]^2}$	$\frac{[\text{cm}]}{[\text{s}]^2}$	$\frac{[\text{mm}]}{[\text{s}]^2}$	$\frac{[\text{ft}]}{[\text{sec}]^2}$	$\frac{[\text{in}]}{[\text{sec}]^2}$
Force	[N]	[dyn]	[N]	[lbf]	[lbf]
Moment	[N][m]	[dyn][cm]	[N][mm]	[ft][lbf]	[in][lbf]
Pressure	[Pa]	[Ba]	[MPa]	$\frac{[\text{lbf}]}{[\text{ft}]^2}$	[psi]
Density	$\frac{[\text{kg}]}{[\text{m}]^3}$	$\frac{[\text{g}]}{[\text{cm}]^3}$	$\frac{[\text{tonne}]}{[\text{mm}]^3}$	$\frac{[\text{slug}]}{[\text{ft}]^3}$	$\frac{[\text{lbf}][\text{sec}]^2}{[\text{in}]^3}$

Fig. 1. Taula consistència d'unitats

Degut a les dimensions de l'estructura, molt adequada per mesurar-la en mil·límetres, a la massa, de 300 quilograms, adequada també a ser mesurada en tones, i finalment a la facilitat per interpretar els esforços en MPa, s'ha decidit escollir la opció proposada a la tercera columna.

D'aquesta manera, la massa estarà expressada en tones mètriques, la longitud en mil·límetres, el temps en segons, la força en Newtons i la pressió en MPa.

3. Anàlisi model actual

En aquesta secció es realitzarà l'anàlisi de l'element absorbidor d'impactes del cotxe Formula Student creat per l'equip ETSEIB Motorsport, amb el qual es va competir l'any 2015.

3.1. Geometria

La geometria de l'element absorbidor d'impactes consta de dues parts: en primer lloc, una placa d'alumini de 380x370x4 mm, la qual anirà fixada a l'estructura del vehicle. D'altra banda, l'element principal de l'absorbidor d'impactes estarà format per un panell d'alumini amb estructura honeycomb, molt adient per a realitzar tasques d'absorció d'energia. El honeycomb es presentarà com un prisma rectangular de 250 mm de costat per 150 mm d'alçada, muntat sobre la placa d'alumini, de tal forma que quedi centrat.

Per a la realització de la simulació s'aprofitarà la simetria de l'estructura, de forma que <només es simularà una quarta part de l'absorbidor d'impactes. Un cop introduïda la geometria a l'ANSYS, i realitzades les corresponents simetries, ens trobem amb la següent estructura.

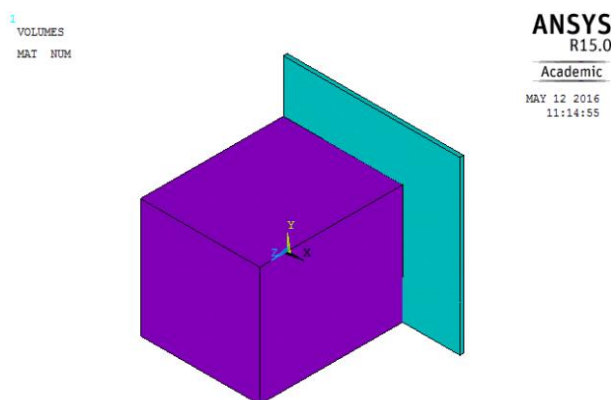


Fig. 2. Geometria bàsica

De color blau clar observem un quart de la placa d'alumini, que si estigués completa tindria el seu centre en l'origen de coordenades. El mateix passa amb el bloc format pel honeycomb. D'aquesta forma, s'aconsegueix reduir notablement el temps de càlcul, ja que el nombre de nodes passa a ser la quarta part. A més, les condicions de contorn quedaran simplificades a l'introduir les condicions de geometria.

3.2. Materials

Per a realitzar la simulació, es requereix introduir el model dels dos materials a simular: l'alumini i l'estructura honeycomb.

3.2.1. Alumini

L'alumini s'emprarà només per a la placa de suport, tot i que el material emprat per a l'estructura honeycomb també sigui alumini. Més endavant s'exposaran les raons per les quals en aquest apartat només es fa referència a la placa de suport.

Només s'introduiran les constants elàstiques de l'alumini, és a dir, el mòdul de Young i el coeficient de Poisson. Durant el posterior anàlisi, s'haurà de tenir present aquest fet, ja que si es troben tensions equivalents de Von Mises superiors al límit elàstic de l'alumini, la simulació perdria la seva validesa. L'alumini passaria a tenir un comportament plàstic no contemplat en aquest model.

A la figura 2 es mostren les propietats elàstiques de l'alumini. El mòdul de Young (EX) es fixa en 69 GPa, mentre que la incidència del coeficient de Poisson no es contempla.

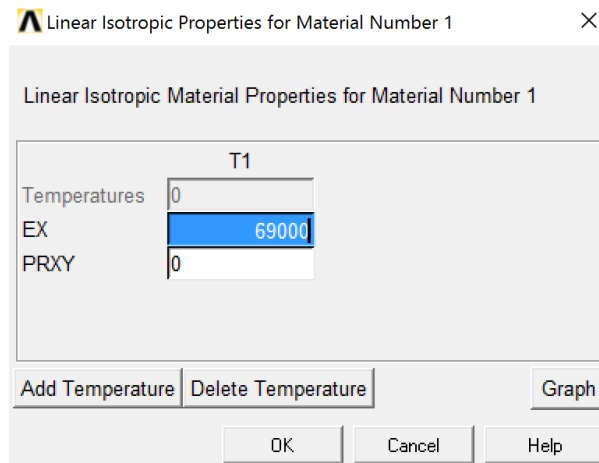


Fig. 3. Propietats elàstiques de l'alumini

3.2.2. Estructura Honeycomb

Com s'ha comentat amb anterioritat, l'estructura honeycomb, tot i estar conformada amb alumini, al no ser una estructura massissa, no es pot considerar el mateix model que a l'apartat anterior. D'aquesta manera, al no tenir dades del fabricant, s'ha procedit a realitzar un assaig a compressió d'una mostra de la mateixa estructura honeycomb.

3.2.2.1. Resultats de l'assaig

Els resultats obtinguts de l'assaig indiquen que el comportament de l'estructura honeycomb es podrà simular mitjançant un model bilineal, és a dir, que constarà de dos trams lineals. El primer tram vindrà representat per les constants elàstiques típiques

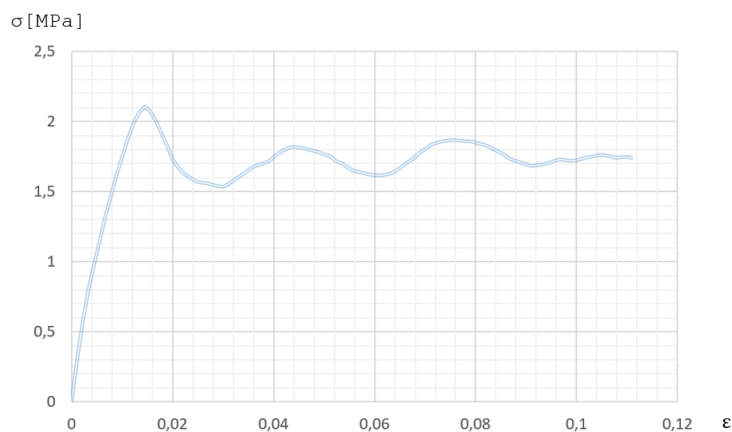


Fig. 4. Gràfic tensió-deformació de l'estructura honeycomb

d'un material elàstic lineal, és a dir el mòdul de Young i el coeficient de Poisson. D'altra banda, el tram plàstic vindrà representat per la tensió màxima assolible al tram lineal, i pel pendent de la recta al tram plàstic. A continuació es pot observar el gràfic corresponent la tensió-deformació de l'estructura honeycomb.

D'aquesta manera, el tram lineal elàstic s'ha considerat que arriba fins a una elongació de 0,01, assolint una tensió de 1,75 MPa. A partir d'aquesta tensió, s'entra al tram plàstic, que serà modelat amb una recta de pendent 0,01 MPa. La raó d'utilitzar un pendent molt petit en comptes de nul és per evitar inestabilitats que podrien aparèixer al poder assolir-se una mateixa tensió en diversos punts d'elongació.

Finalment, un cop s'ha obtingut les característiques necessàries per a la simulació, s'introdueixen a l'ANSYS.

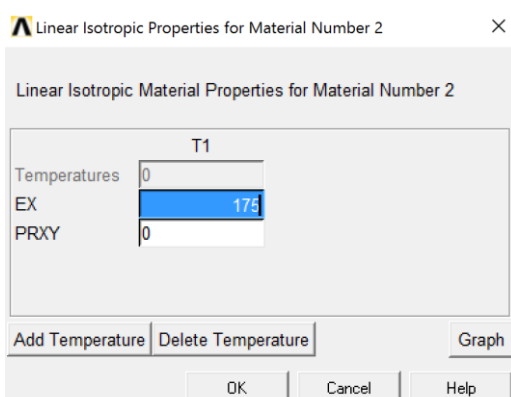


Fig. 5. Propietats elàstiques de l'estructura honeycomb

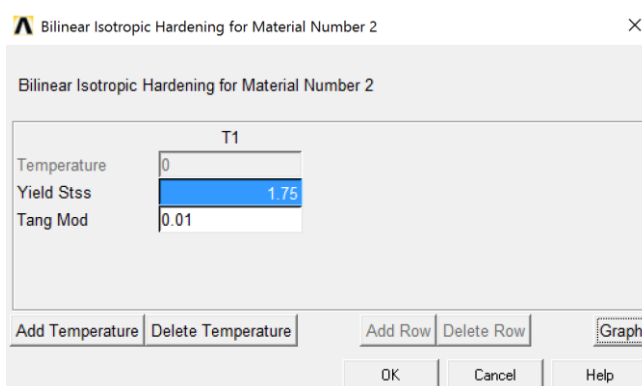


Fig. 6. Propietats plàstiques de l'estructura honeycomb

El mòdul de Young queda fixat en 175 MPa, el coeficient de Poisson es negligeix, la tensió límit entre tram elàstic i plàstic en 1,75 MPa i finalment el pendent del tram plàstic en 0,01 MPa. D'aquesta manera, el gràfic simplificat que modela el comportament de l'estructura honeycomb és el següent:

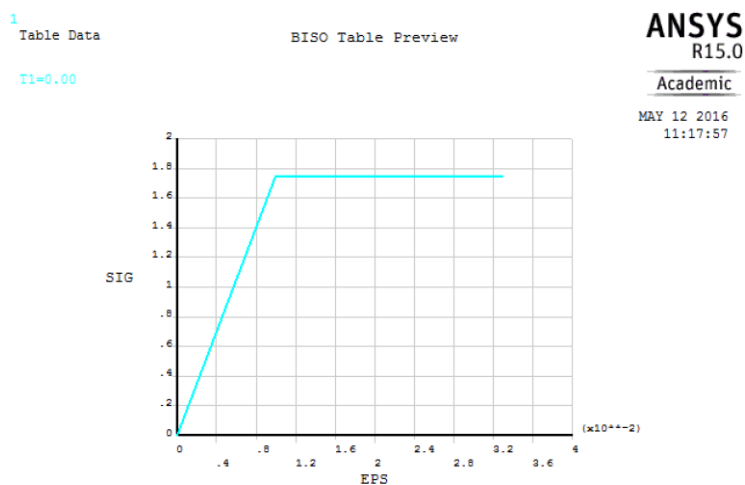


Fig. 7. Gràfic tensió-deformació simplificat de l'estructura honeycomb

3.3. Tipus d'elements

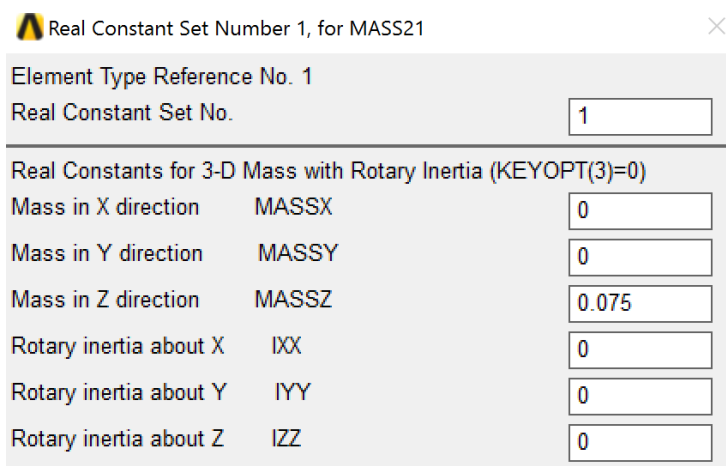
Per a modelar totes les parts i poder simular l'impacte es requereixen, a més de la placa de fixació i l'estructura honeycomb, quatre àrees auxiliars que permetran simular el contacte entre placa de fixació i estructura honeycomb, i entre la massa de i l'estructura honeycomb.

En primer lloc, per a modelar l'estructura honeycomb i la placa s'ha utilitzat l'element SOLID185, que simula un element sòlid amb 8 nodes, és a dir interpola linealment entre aquests 8 nodes.

En segon lloc, per a les àrees auxiliars de contacte s'utilitzaran dos elements, depenent de si l'àrea té un comportament rígid, com es el cas de l'àrea on estarà fixada la massa. Per aquesta àrea s'utilitzarà l'element TARGE170. En canvi, per a les àrees que tenen un comportament flexible, s'utilitzarà l'element CONTA174. Cal remarcar que no és necessari introduir aquests elements, ja que quan posteriorment es defineixin els contactes, si no s'han definit, es crearan automàticament.

Finalment, per a la massa puntual s'utilitzarà l'element MASS21, que simula una massa concentrada en un punt en un espai 3D.

L'únic element que requereix de definició de constants és aquest últim, el MASS21. Les constants a definir són les masses inercials en les tres direccions x, y i z, així com també els moments d'inèrcia en els tres eixos. Com que la simulació només requerirà la definició de la massa inercial en la direcció z, es fixen els altres en 0 per facilitar càlculs. La massa inercial en la direcció z es fixa en 0,075 tones, equivalent a la massa de 300 kg aplicant dues simetries.



Real Constants for 3-D Mass with Rotary Inertia (KEYOPT(3)=0)		
Mass in X direction	MASSX	0
Mass in Y direction	MASSY	0
Mass in Z direction	MASSZ	0.075
Rotary inertia about X	IXX	0
Rotary inertia about Y	IYY	0
Rotary inertia about Z	IZZ	0

Fig. 8. Constants corresponents al element MASS21

3.4. Mallat

Un cop definits els elements, la geometria i els materials emprats, es procedeix a mallar la geometria. El mallat és un dels passos més importants en la recreació d'un model, ja que determinarà en gran part la fiabilitat de la simulació. És per això que es procedeix a realitzar un mallat manual.

3.4.1. Dimensionat per línies

En aquest cas, es procedirà a determinar el nombre d'elements per cada línia, amb la qual cosa quedarà determinat el mallat final. Per tal fixar el nombre d'elements en que es subdividirà una línia ens dirigim a l'eina MeshTool, on trobarem el següent menú:

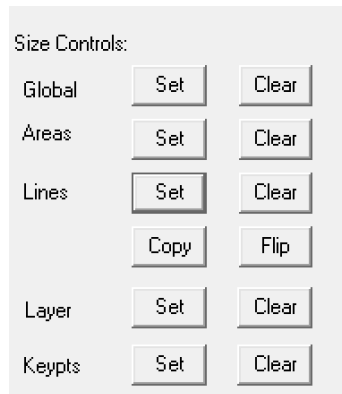


Fig. 9. Menú Size Controls

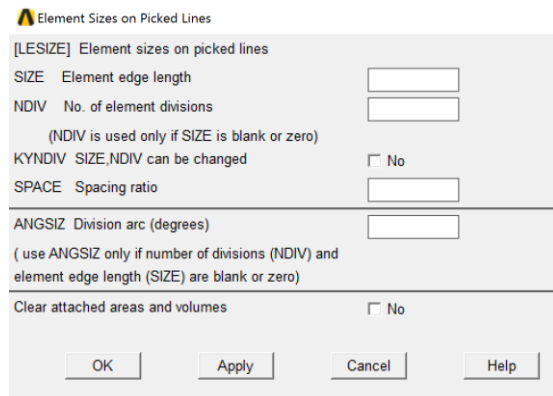


Fig. 10. Menú mida element a les línies seleccionades

Seleccionem la opció Set, al costat de Lines, i procedim a seleccionar les línies que volem dimensionar. Un cop seleccionades es desplega el menú de la figura 9, on podem seleccionar NDIV, és a dir el nombre de divisions per línia. Tanmateix, si no es canvia l'opció KYNDIV a No, el programa es reserva l'opció de canviar el nombre de divisions. La placa es dimensionarà amb 15x3 divisions, és a dir que tindrà un total de 15x15x3 elements. D'altra banda, l'estructura honeycomb es dimensionarà amb 5x5x5 divisions, és a dir amb un total de 125 elements.

3.4.2. Atributs dels elements

Abans de procedir a la generació del mallat, és necessari assignar el tipus de element, material i constants a cada volum, àrea o keypoint. Al menú Mesh Attributes trobarem l'opció d'assignar aquestes característiques tan a volums com a àrees o keypoints mitjançant el desplegable que es pot observar a la figura 10.

	Material	Constant	Element
Placa fixació	1	-	SOLID185
Honeycomb	2	-	SOLID185
Massa puntual	-	1	MASS21

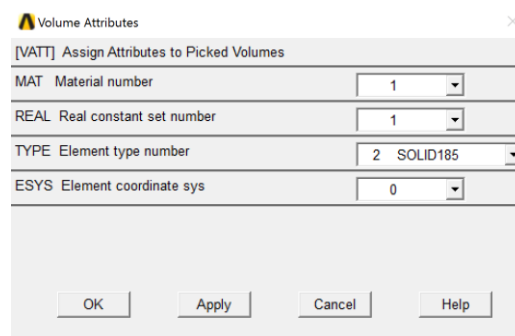


Fig. 11. Assignació d'atributs als elements

Finalment, un cop assignades les dimensions a les línies i els atributs a cada volum, àrea o keypoint, es procedeix al mallat final de tots els elements. A la figura 12 es pot observar el mallat final de l'estructura, així com també el mallat de les àrees de contacte i la massa puntual.

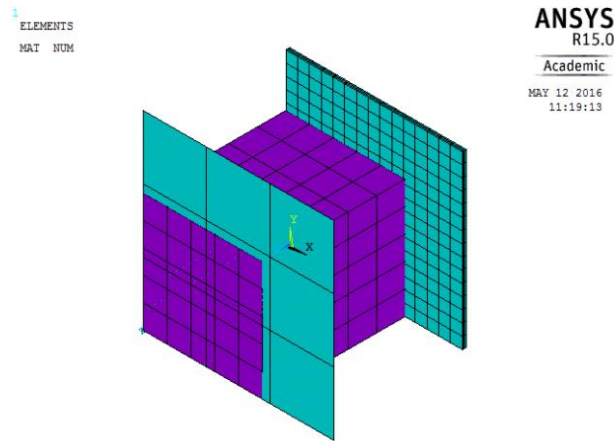


Fig. 12. Geometria bàsica

3.5. Contactes

Finalment, el paquet d'ANSYS Mechanical APDL 15.0 no detecta les col·lisions automàticament. Per aquesta raó, és necessari indicar entre quines superfícies es vol simular el contacte. Els dos contactes a introduir són: en primer lloc, entre l'àrea a la qual anirà enganxada la massa puntual i l'estructura honeycomb; i en segon lloc entre l'estructura honeycomb i la placa de fixació.

3.5.1. Contacte massa - estructura honeycomb

Per modelar aquest contacte s'imposarà que l'àrea a la qual va adherida la massa sigui completament rígida, mentre que l'estructura honeycomb serà deformable, segons les característiques del material, prèviament introduïdes.

Per tal de caracteritzar una superfície de contacte rígida en moviment, se li ha d'assignar un node pilot, és a dir, tots els nodes de la superfície de contacte rígida tindran el mateix moviment que el node pilot. En aquest cas, el node pilot escollit és el node al qual s'ha assignat a la massa.

El procediment per a crear el contacte és simple, ja que es disposa d'un assistent per a generar contactes. Només s'ha de tenir en compte a seleccionar la opció *Contacte rígid amb node pilot* per l'àrea de la massa, i *flexible* per la de l'estructura honeycomb. A la figura 13 es poden apreciar els detalls del contacte, així com també el node pilot seleccionat.

3.5.2. Contacte estructura honeycomb - placa de fixació

Per modelar aquest contacte s'imposarà que les dues àrees siguin flexibles. En aquest cas és indiferent l'àrea que es seleccioni primer, ja que les dos tenen el mateix comportament en quan a elasticitat. A la figura 13 es poden observar els detalls del contacte.

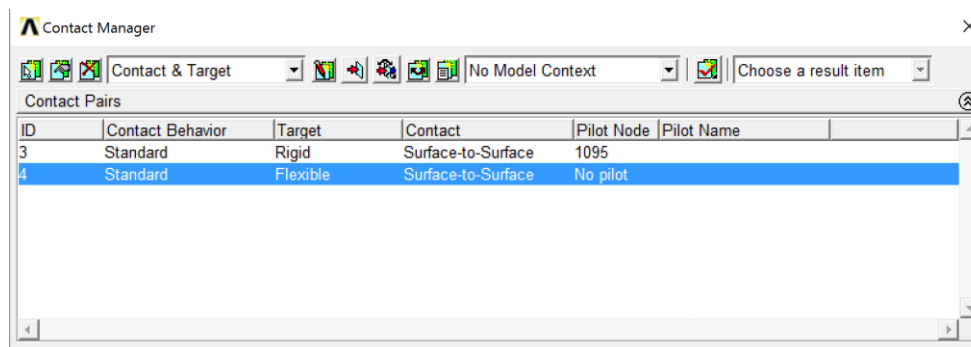


Fig. 13. Creació de contactes

3.6. Condicions de contorn i condicions inicials

Finalment, abans de procedir a la simulació, s'han d'introduir les condicions de contorn i les condicions inicials. És a dir, fixar els moviments d'uns determinats nodes per tal que s'assembli el màxim possible a la realitat, i que el programa pugui trobar una solució per a la simulació.

En primer lloc, s'ha de determinar el suport fix de l'estructura. En aquesta primera simulació, es fixaran les arestes exteriors de la placa de fixació d'alumini, es a dir, es restringiran tots els graus de llibertat per als nodes que pertanyin a aquestes arestes. A la figura 14 es poden observar com aquests nodes han perdut tots els seus graus de llibertat.

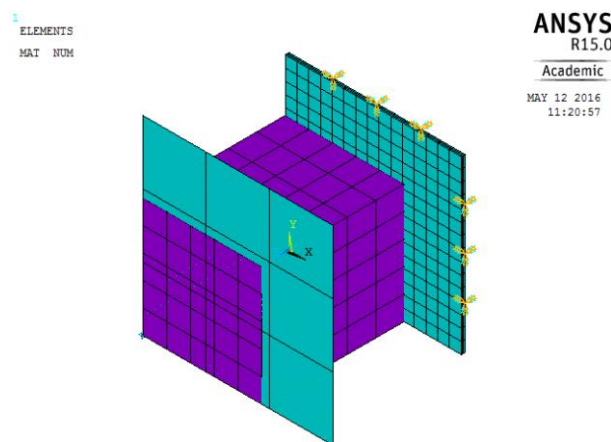


Fig. 14. Condició de contorn del suport fix

En segon lloc, s'ha d'aplicar les condicions de simetria. ANSYS ens proporciona una eina de molt simple utilització, ja que simplement hem d'indicar les àrees pertanyents als plans de simetria, i automàticament quedaran restringits els moviments adequats. Els nodes pertanyents als plans de simetria perdran tots els graus de llibertat, excepte aquells corresponents al moviment en el mateix pla, és a dir dos moviments de translació i un de rotació.

Finalment, es restringiran tots els moviments del node al qual hem assignat la massa, excepte el de translació al llarg de l'eix Z, que es la direcció en la qual es produirà l'impacte. Podem observar aquesta restricció a la figura 17.

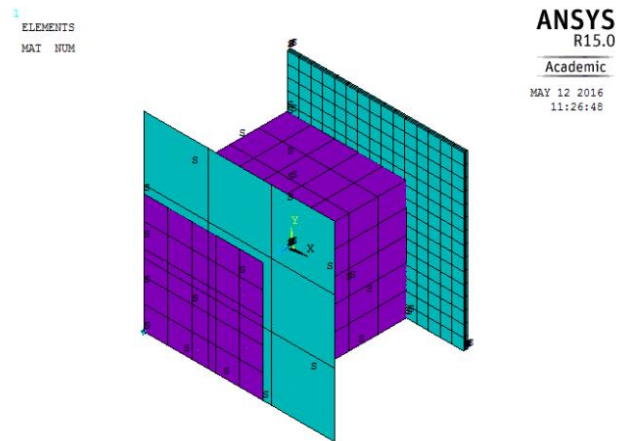


Fig. 15. Condió de contorn de simetria

Finalment, se li donarà una velocitat inicial a la massa de -7000 mm/s en la direcció Z. A la figura 16 es pot observar el menú que ens permet assignar unes condicions inicials a cada node, tan de translació com de velocitat.

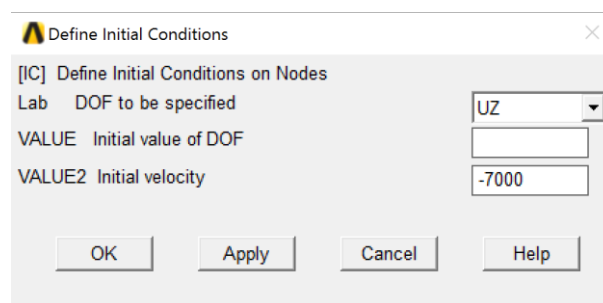


Fig. 16. Assignació de condicions inicials a la massa

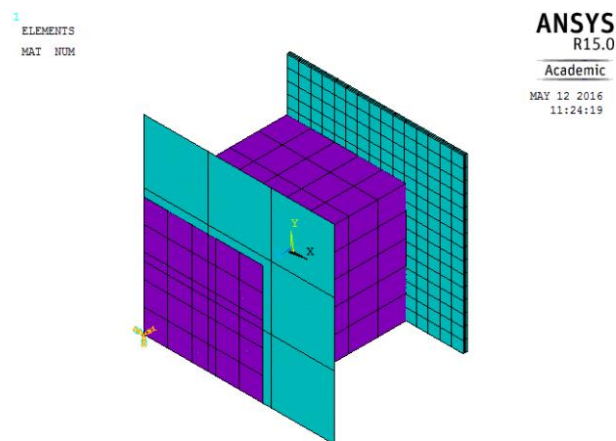


Fig. 17. Condió de contorn restricció moviment massa

3.7. Tipus d'anàlisi i Controls

Per últim, s'ha de determinar el tipus d'anàlisi que realitzarà el programari. En primer lloc, determinen que sigui un anàlisi de tipus transitori. Com que no sabem realment quan durarà l'impacte, assignem a l'anàlisi una durada de 20 milisegons, i

posteriorment, amb l'ajuda del gràfic velocitat de la massa en funció del temps, observarem quan aquesta es fa 0 i per tant quina és la durada de l'impacte.

D'altra banda, és molt important escollir bé l'increment de temps entre un instant de temps i el següent. Un increment de temps molt petit donarà una solució molt bona, però pot portar temps de simulació de diverses hores. D'altra banda, un increment de temps relativament gran no donarà una solució tan exacta, però el temps de càlcul necessari serà molt més breu. Així doncs, és necessari trobar un bon equilibri al no disposar de potents ordinadors de càlcul.

Finalment, cal ajustar les opcions de gravació de resultats. Per estalviar temps de càlcul, només serà necessari gravar un de cada cinc instants de temps. D'aquesta manera s'obtidran uns gràfics i unes animacions amb un nombre d'instants de temps més que acceptable.

Tots els ajustos comentats es poden observar a següent figura.

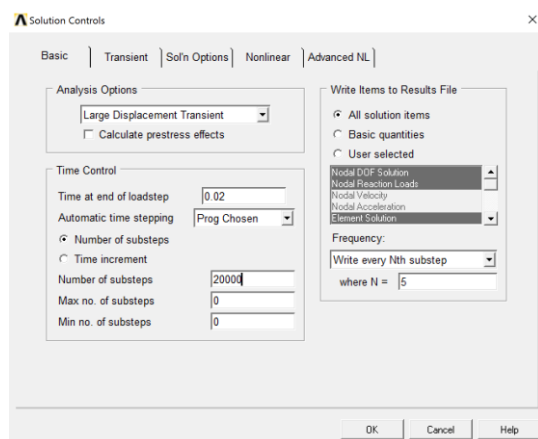


Fig. 18. Menú amb diversos controls de la solució

3.8. Anàlisi de resultats

Un cop realitzada la simulació, es procedeix a realitzar l'anàlisi de resultats. Tal com s'ha esmentat amb anterioritat, per tal de comprovar la funcionalitat de l'element absorbidor d'impactes ens centrarem en dos criteris: en primer lloc, el criteri de rigidesa de la placa de fixació; d'altra banda, s'analitzaran tan l'acceleració màxima com la mitjana de la massa puntual.

3.8.1. Determinació del final de l'impacte

Per tal de determinar l'instant final de l'impacte, analitzarem el gràfic de la velocitat de la massa en funció del temps. El punt on la velocitat de la massa sigui nul·la serà l'instant de temps on finalitza l'impacte.

D'aquesta manera, es determina que l'impacte es produeix durant els primers 15,5 milisegons.

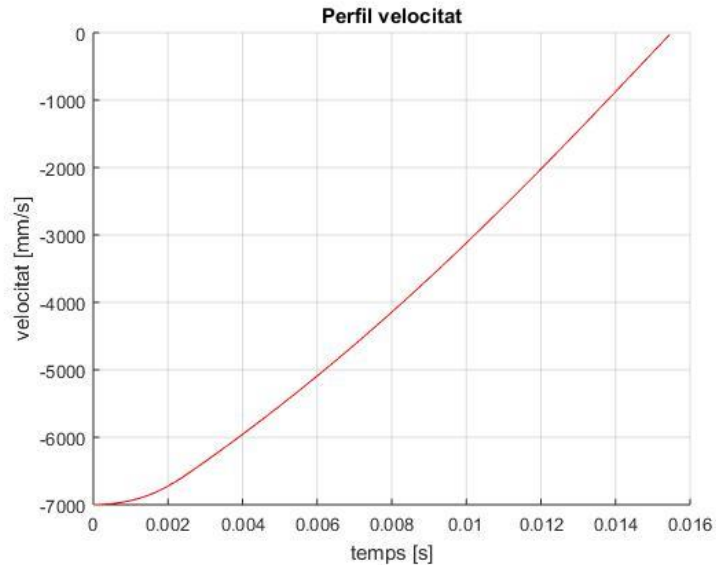


Fig. 19. Gràfic de la velocitat de la massa en funció del temps

3.8.2. Criteri de resistència i rigidesa de la placa de fixació

Tal com s'ha descrit als objectius, la placa de fixació no pot deformar-se més d'una polzada, és a dir 25,4 mm. D'altra banda, s'haurà de comprovar que les tensions a la placa de fixació d'alumini no superin el límit elàstic del material.

En primer lloc s'analitzarà la deformació de la placa. Per tal d'assegurar que cap punt de la placa s'endinsarà més de 25,4 mm de la seva posició en repòs, només caldrà comprovar que el punt central de la placa no ho faci, ja que és el punt amb un màxim desplaçament. Tanmateix, cal recordar que el punt central de la placa completa és el punt corresponent a l'origen de coordenades en la simulació degut a les dues simetries implementades. El següent gràfic mostra la deformació en mil·límetres d'aquest punt en funció del temps.

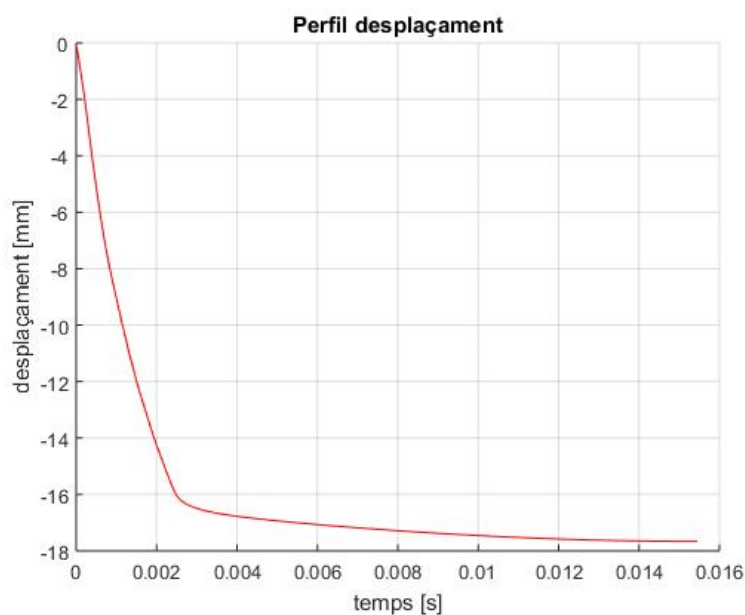


Fig. 20. Gràfic deformació del centre de la placa en funció del temps

S'observa que al principi la deformació es molt ràpida, però quan la placa ja s'ha deformat prou per a poder suportar la tensió que fa que l'estructura honeycomb es deformi plàsticament, aquesta deformació disminueix en pendent i s'estabilitza, fins arribar a un màxim de -17,7 mm. Seguidament, quan tota l'energia cinètica de la massa ha passat o bé a energia elàstica de la placa d'alumini o bé a energia per a deformar el honeycomb, es produeix un retrocés de la massa, que torna a absorbir l'energia elàstica de la placa. D'aquesta manera, es pot determinar que l'impacte es produeix en els primers 15,5 milisegons.

Així doncs, la placa de fixació d'alumini compleix el criteri de rigidesa establert.

En segon lloc, cal comprovar que les tensions a la placa no superin el límit elàstic del material, en el nostre cas l'alumini. El punt de màximes tensions serà al final del impacte, quan tota l'energia cinètica de la massa s'hagi transmès a l'estructura. A la figura 20 es pot observar la distribució de tensions en aquest instant, als 15,5 milisegons.

Es pot observar que apareix una concentració de tensions a l'extrem superior dret de la placa, degut a les condicions de contorn idealitzades. Tanmateix, un cop ens allunyem de la concentració de tensions, les tensions màximes es troben al voltant dels 300-400 MPa. Per tant, s'haurà d'escollir un alumini que el seu límit elàstic sigui superior a aquests valors.

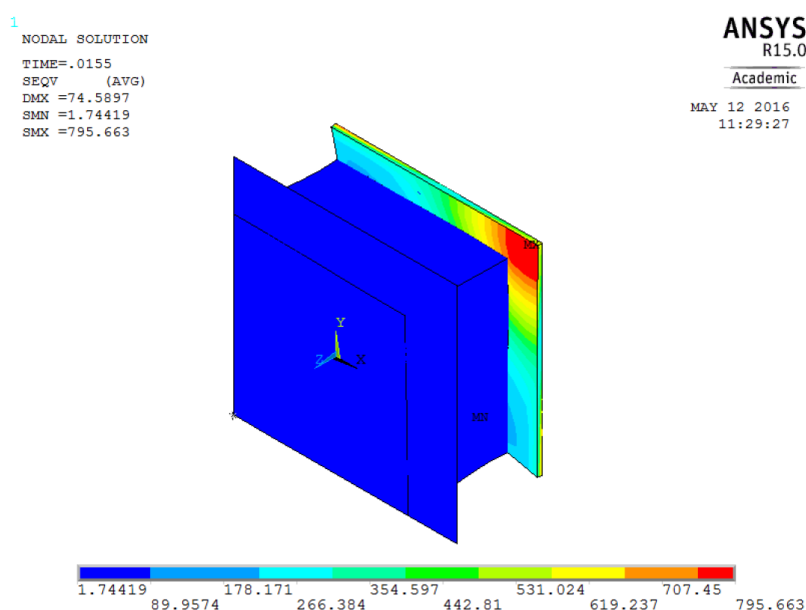


Fig. 21. Distribució de tensions a l'instant final de l'impacte

3.8.3. Acceleració de la massa

En segon lloc, cal comprovar que l'acceleració mitjana de la massa no superi els 20g, i que el pic màxim d'acceleració no superi els 40g.

A la figura 21 es pot apreciar el gràfic acceleració de la massa en funció del temps. El valor màxim de la corba es correspon al punt final de l'impacte, assolint un valor de:

$$586404 \frac{mm}{s^2} = 586,404 \frac{m}{s^2} = 59,78 g$$

Per tant, el valor màxim de l'acceleració supera el límit de 40g imposat per la normativa.

Pel que fa al valor de l'acceleració mitjana, aquest s'ha calculat obtenint la suma de l'àrea sota la corba, i dividint-la per el temps final de l'impacte, obtenint un valor de:

$$451000 \frac{mm}{s^2} = 451 \frac{m}{s^2} = 45,97 g$$

Per tant, tampoc es compleix aquest requisit

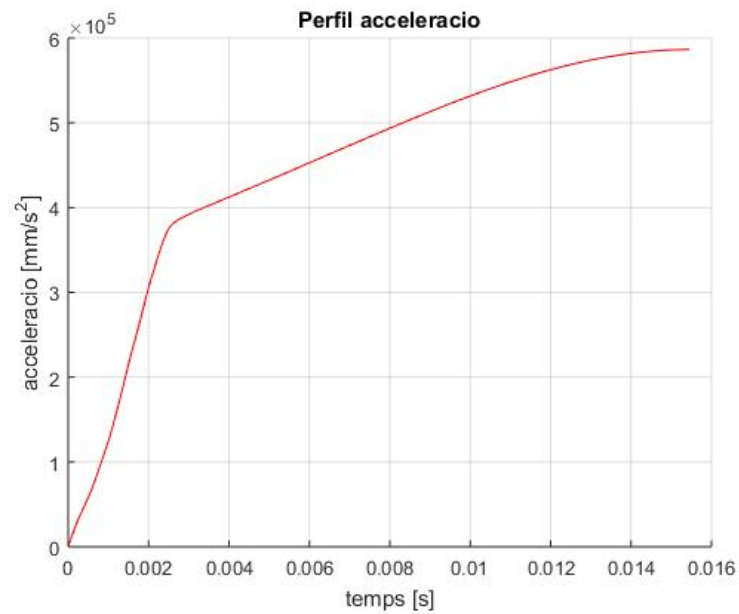


Fig. 22. Gràfic acceleració de la massa en funció del temps

4. Primer disseny

En aquesta secció es procedirà al disseny i anàlisi d'un nou model d'absorbidor d'impactes per a un cotxe formula Student. Es realitzaran diversos models en funció d'una variable, per tal d'estimar l'impacte d'aquesta variable sobre les característiques crítiques de l'absorbidor d'impactes.

4.1. Geometria

La geometria exterior del nou model d'absorbidor d'impactes és molt semblant a la del model actual, degut al fet que s'ha d'encabir en el mateix espai que el seu predecessor. D'aquesta manera, la placa d'alumini té les mateixes dimensions (360x370x4 mm), i el bloc cúbic també (250x250x150 mm). La gran diferència amb l'anterior és que el material principal absorbidor d'energia ha passat a ser un material compost, en comptes de l'alumini en forma de honeycomb. Aquest canvi de material ha permès efectuar un buidat interior del cub, deixant només les parets exteriors i una creu, amb el seu eix paral·lel a la direcció de l'impacte, tal com es mostra a la figura 23.



Fig. 23. Estructura interna del bloc cúbic

La variable d'aquest nou model és el gruix de paret de l'estructura cúbica. Per tal d'analitzar la influència d'aquesta variable en les característiques del model i en la seva resposta temporal a l'impacte es realitzaran diverses simulacions i anàlisis amb diferents gruixos. Les simulacions realitzades han sigut de gruixos de paret $t = \{1, 2, 4, 6, 8, 10\}$ mm. A la figura 24 s'observa la nova geometria, un cop aplicada la doble simetria.

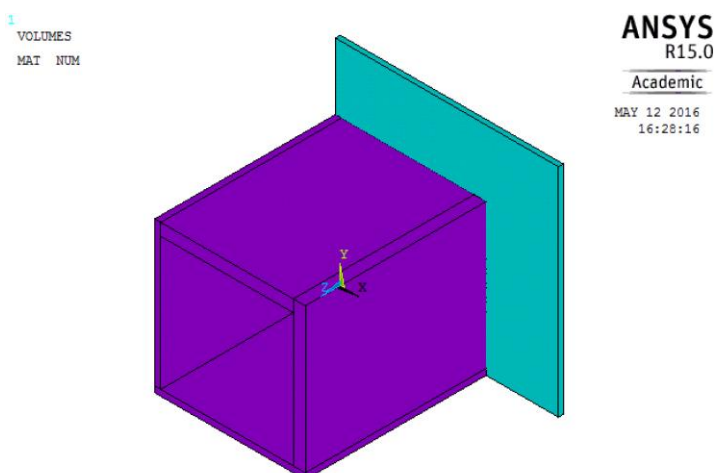


Fig. 24. Geometria del nou disseny.

4.2. Materials

Per a realitzar les simulacions, es requereix introduir el model dels dos materials a simular: l'alumini i el material compost.

4.2.1. Alumini

L'alumini s'emprarà només per a la placa de suport, tot i que el material emprat per a l'estructura honeycomb també sigui alumini. Més endavant s'exposaran les raons per les quals en aquest apartat només es fa referència a la placa de suport.

Només s'introduiran les constants elàstiques de l'alumini, és a dir, el mòdul de Young i el coeficient de Poisson. Durant el posterior anàlisi, s'haurà de tenir present aquest fet, ja que si es troben tensions equivalents de Von Mises superiors al límit elàstic de l'alumini, la simulació perdria la seva validesa. L'alumini passaria a tenir un comportament plàstic no contemplat en aquest model.

A la figura 25 es mostren les propietats elàstiques de l'alumini. El mòdul de Young (EX) es fixa en 69 GPa, mentre que la incidència del coeficient de Poisson no es contempla.

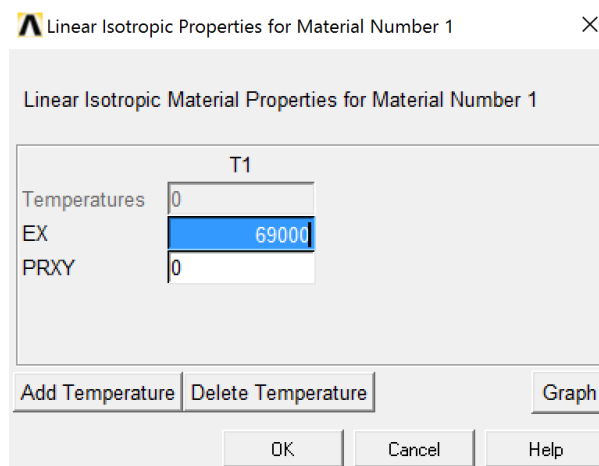


Fig. 25. Propietats elàstiques de l'alumini

4.2.2. Material Compost

El material compost a utilitzar és resina armada amb fibra de carboni, un material lleuger però que presenta unes bones propietats mecàniques per aquest tipus d'aplicacions.

La resina armada amb fibra de carboni es modelitzarà amb un tipus bilineal, és a dir el gràfic tensió-deformació constarà de dos trams lineals. El primer d'ells, l'elàstic, estarà caracteritzat per un mòdul de Young $E = 180000$ MPa, fins a assolir-se una tensió de 1400 MPa, on començarà a deformar-se plàsticament, amb un mòdul tangent de 1800 MPa. Es poden observar les característiques descrites a la figura 26.

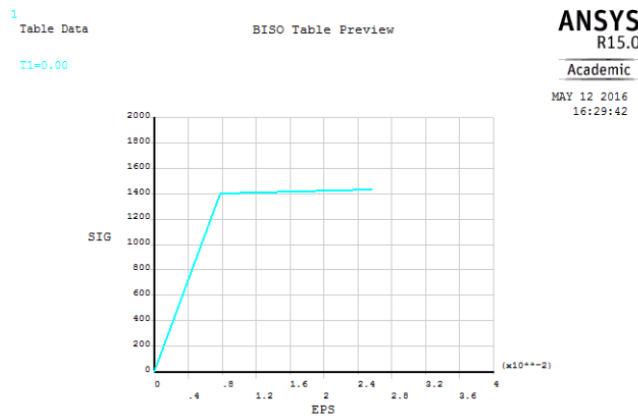


Fig. 26. Gràfic tensió-deformació simplificat de la resina armada amb fibra de carboni

4.3. Condicions del model i la simulació

Els tipus d'elements utilitzats són els mateixos que al primer anàlisi. Per a la placa i les parets que conformen l'estructura cúbica s'ha utilitzat un element sòlid amb 8 nodes (SOLID185). Per a simular la massa s'ha emprat el MASS21, amb una massa de 0.075 tones en la direcció Z, és a dir la direcció de l'impacte.

Els contactes creats són els mateixos que en el primer anàlisi. En primer lloc s'ha creat el contacte entre la resina armada amb fibra de carboni i la placa d'alumini, caracteritzant-se per ser un contacte flexible. D'altra banda, s'ha modelat el contacte entre la superfície auxiliar on anirà enganxada la massa i la resina armada amb fibra de carboni. Aquest s'ha caracteritzat com un contacte rígid, on tota la superfície auxiliar tindrà el mateix comportament que el node de la massa.

El mallat efectuat s'ha basat en elements prismàtics tan a la placa d'alumini com a les parets que conformen l'estructura cúbica. Finalment s'ha mallat el node pilot del contacte amb el tipus d'element MASS21.

Les condicions de contorn introduïdes han sigut les mateixes que a l'anterior simulació. En primer lloc s'ha introduït les simetries i s'ha fixat el marc exterior de la placa d'alumini (recordant que només es té una quarta part del model degut a les simetries). Finalment, s'ha restringit el moviment de la massa en totes les direccions i rotacions, exceptuant la direcció Z, que és la de l'impacte. Finalment, s'ha donat una velocitat inicial a la massa de 7 m/s.

El tipus d'anàlisi realitzat ha sigut un transitori, amb temps final de 10 ms i utilitzant 5000 increments de temps, amb la qual cosa cada increment de temps ha sigut de $2 \cdot 10^{-5}$ segons. Aquest fet ha portat una bona convergència a totes les simulacions. Finalment, s'ha seleccionat la opció *Large Displacement*.

Per últim, per tal d'estalviar memòria, s'ha decidit només guardar un de cada cinc increments de temps, que ja donarà una resolució mes que suficient per a realitzar el posterior anàlisi.

4.4. Anàlisi de resultats

Per procedir a l'anàlisi conjunt de resultats, abans es presentaran els resultats individuals de cada simulació breument. De cada simulació es presentaran els perfils de velocitat i acceleracions de la massa, així com també la distribució de tensions a la placa d'alumini al moment de velocitat 0 de la massa, que correspon amb el moment més crític per a la placa. Finalment, es donarà el valor de desplaçament màxim en la direcció Z de la placa. Recordem que, per normativa, s'ha de complir que el desplaçament màxim de qualsevol punt de la placa no pot superar els 25,4 mm i l'acceleració mitjana de la massa ha de ser inferior als 20g i el pic màxim no pot superar els 40g.

4.4.1. Gruix de 10 mm

En aquesta simulació s'ha donat un gruix de 10 mm a totes les parets conformades amb resina reforçada amb fibra de carboni. En primer lloc, es comprovaran els perfils d'acceleració i velocitat de la massa. Seguidament es comprovarà el bon funcionament de la resina armada amb fibra de carboni a través de l'anàlisi de la deformació plàstica.

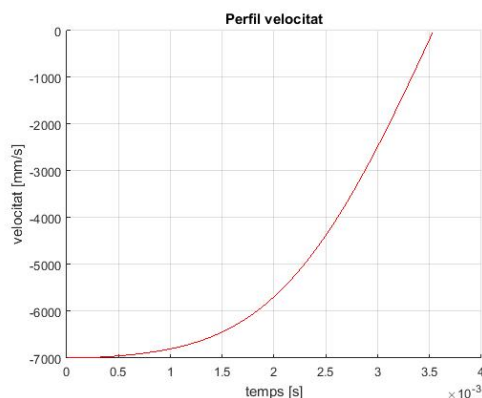


Fig. 27. Gràfic velocitat-temps

A la figura 27 trobem el gràfic velocitat de la massa en funció del temps. D'aquest s'extreu que la massa queda aturada, i per tant finalitza l'impacte, a l'instant 3,53 ms. Amb aquest valor podrem calcular l'acceleració mitja i el pic màxim d'acceleracions a partir del gràfic de l'acceleració, ja que podrem determinar on finalitza l'impacte.

D'aquesta manera obtenim els valors mitjà i màxim de l'acceleració:

$$a_{mitjana} = 1976029,17 \frac{mm}{s^2} = 201,43 g$$
$$a_{màxima} = 4751755,45 \frac{mm}{s^2} = 484,38 g$$

Per tant, observem que els dos valors estan molt per damunt del que permet la normativa.

Finalment, tot i que es descarta aquest model, es comprova la deformació plàstica de la resina armada amb fibra de carboni al moment final de l'impacte, és a dir quan la massa té velocitat nul·la.

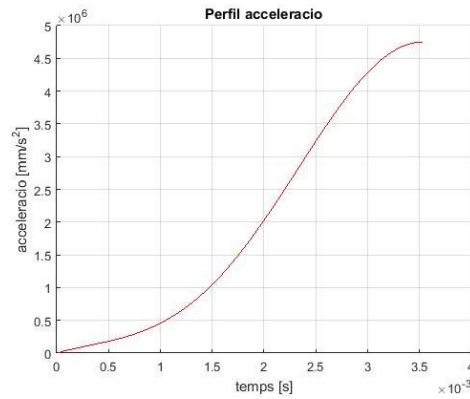


Fig. 28. Gràfic acceleració temps

D'aquesta manera, s'observa que el material no absorbeix cap tipus d'energia de forma permanent. D'altra banda, la deformació plàstica que s'observa pot ser deguda a una singularitat, no contemplada en la simulació.

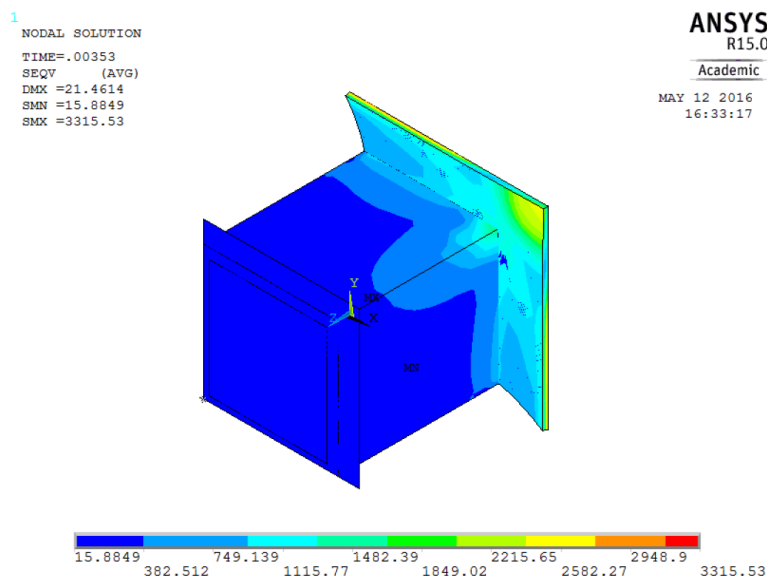


Fig. 29. Distribució de tensions equivalents

4.4.2. Gruix de 8 mm

Per aquesta simulació es comprovarà el mateix. S'espera que reduint el gruix de la paret, i per tant l'àrea perpendicular a la direcció d'impacte, la tensió al material compost sigui més elevada i per tant entri en la zona de deformació plàstica.

Primer de tot procedim al càlcul d'acceleracions mitjana i màxima, per comprovar si entren dins el que la normativa permet.

D'aquesta manera obtenim els valors mitjà i màxim de l'acceleració:

$$a_{mitjana} = 1975965,02 \frac{mm}{s^2} = 201,42 g$$

$$a_{màxima} = 4740745,74 \frac{mm}{s^2} = 483,26 g$$

De la mateixa manera que amb 10 mm de gruix de paret, observem que els dos valors estan molt per damunt del que permet la normativa.

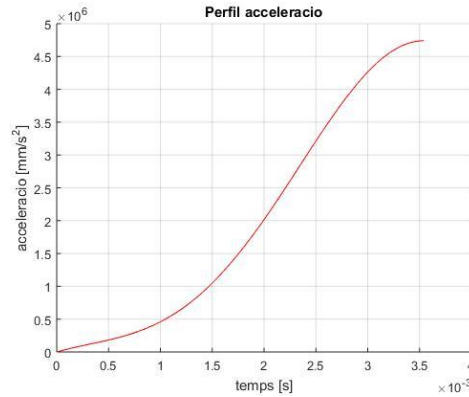


Fig. 30. Gràfic acceleració temps

Tot i que descartem el model, és interessant comprovar la deformació plàstica, per tal de poder observar una possible millora respecte al model amb 10 mm de gruix de paret.

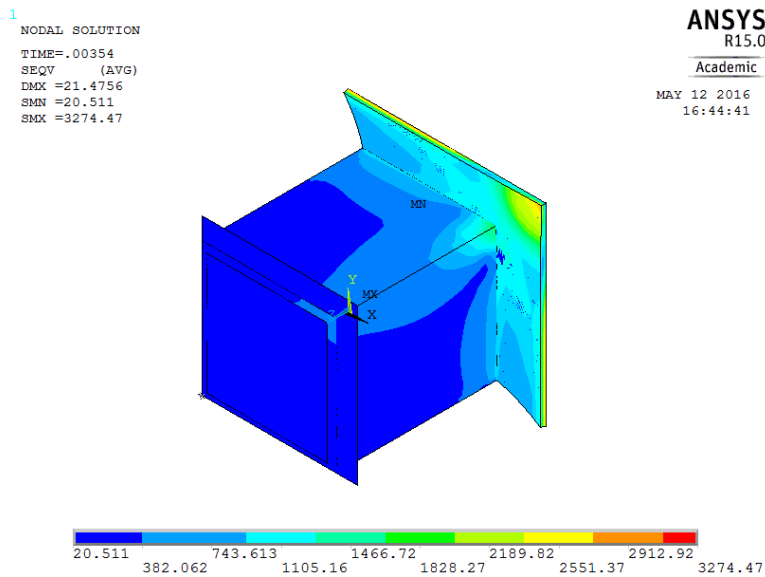


Fig. 31. Distribució de tensions equivalents

No es determina cap diferència apreciable respecte l'anterior. Per tant, podem deduir que encara estem lluny de fer entrar la resina armada amb fibra de carboni al règim de deformació plàstica.

4.4.3. Gruix de 6 mm

Es procedeix amb les simulacions planejades, per tal de comprovar si la resina armada amb fibra de carboni entra en règim de deformació plàstica.

Primer de tot procedim al càlcul d'acceleracions mitjana i màxima, per comprovar si entren dins el que la normativa permet.

D'aquesta manera obtenim els valors mitjà i màxim de l'acceleració:

$$a_{mitjana} = 1969982,31 \frac{mm}{s^2} = 200,81 g$$
$$a_{màxima} = 4735163,31 \frac{mm}{s^2} = 482,69 g$$

Les acceleracions simulades estan també molt lluny del que marca la normativa, que estableix l'acceleració mitjana en 20 g i la màxima en 40 g.

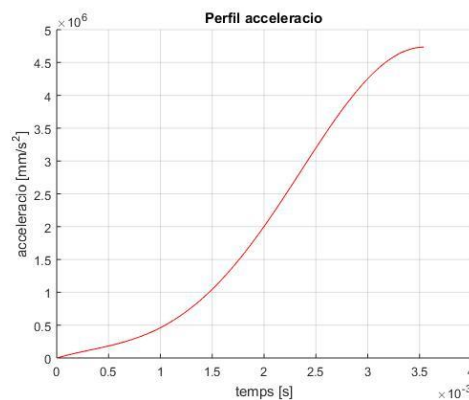


Fig. 32. Gràfic acceleració temps

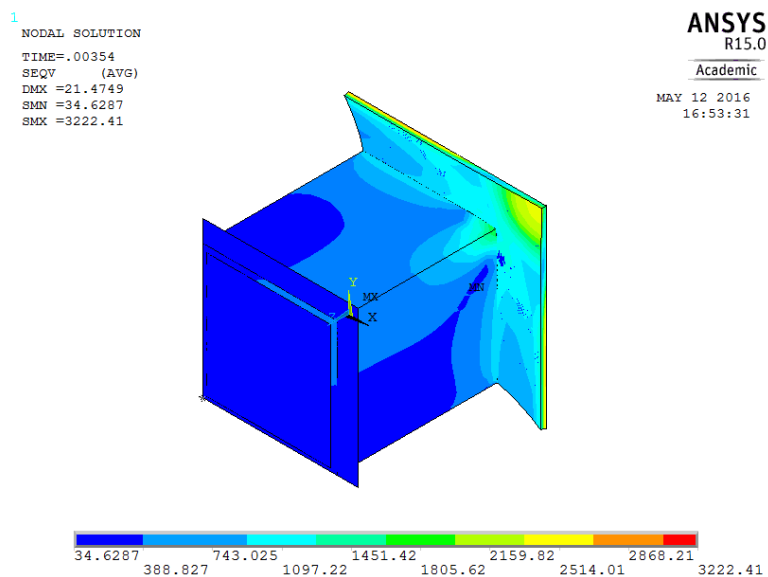


Fig. 33 Distribució de tensions equivalents

Observem que la deformació plàstica del material compost es negligible, ja que ve donada per una concentració de tensions a la zona.

El comportament és gairebé idèntic al de la simulació amb 8 mm de gruix de paret. Simplement al tenir menys àrea en la direcció perpendicular a l'impacte, les tensions equivalents a la resina armada amb fibra de carboni seran majors. Tot i així, encara estan lluny de la tensió de fluència, establerta en 1400 MPa.

4.4.4. Gruix de 4 mm

Es procedeix a simular l'impacte amb un gruix de paret de 4 mm, encara que es preveu que el resultat serà el mateix que el cas de 6 mm de gruix de paret, ja que les tensions a la resina armada amb fibra de carboni eren molt lluny d'assolir el límit de fluència.

Novament calculem les acceleracions màxima i mitjana per a aquesta simulació:

$$a_{mitjana} = 1970349,85 \frac{mm}{s^2} = 200,85 g$$

$$a_{màxima} = 4698244,62 \frac{mm}{s^2} = 478,92 g$$

Tal i com s'havia previst, les acceleracions segueixen estant lluny d'encabir-se dins de la normativa.

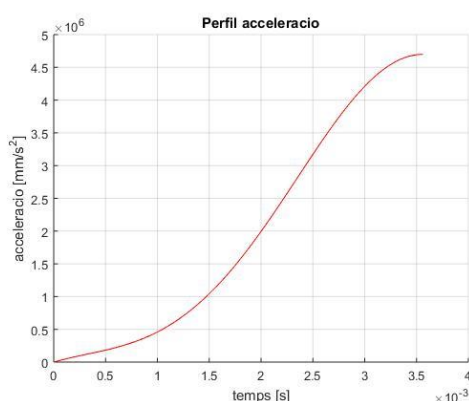


Fig. 34. Gràfic acceleració temps

Pel que fa a la deformació plàstica, la resina armada segueix lluny d'entrar dins el règim plàstic, però observem clarament un augment en les tensions, que es situen al voltant dels 500 MPa en la majoria de l'estructura composta, i trobem una concentració de tensions a les arestes del prisma rectangular.

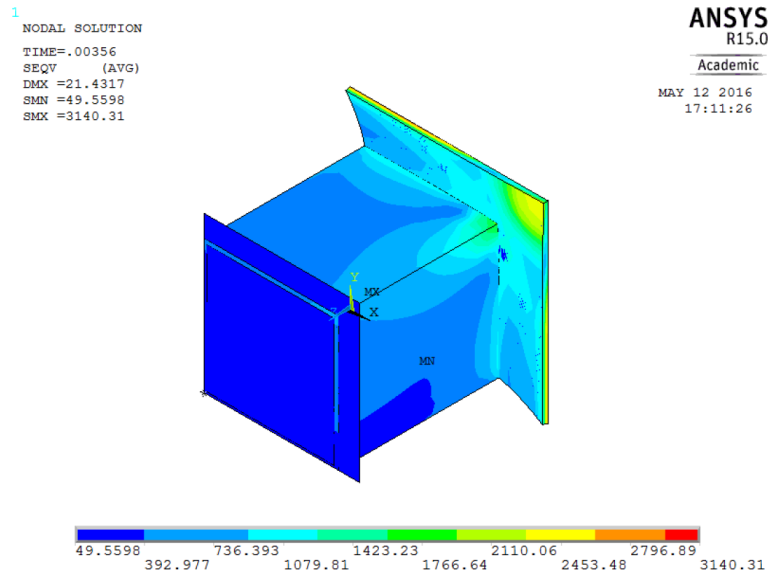


Fig. 35. Distribució de tensions equivalents

4.4.5. Gruix de 2 mm

Es segueix amb la simulació de 2 mm de gruix de paret. S'espera un augment de tensions, sense arribar a la tensió de fluència.

S'obtenen les acceleracions mitjana i màxima d'igual manera que a les anteriors simulacions:

$$a_{mitjana} = 1940939,21 \frac{mm}{s^2} = 197,85 g$$

$$a_{màxima} = 4568181,03 \frac{mm}{s^2} = 465,67 g$$

Previsiblement, es tornen a trobar fora de normativa. Seguim observant un comportament idèntic a les altres simulacions, amb la única diferència de l'increment de tensions a la resina armada amb fibra de carboni.

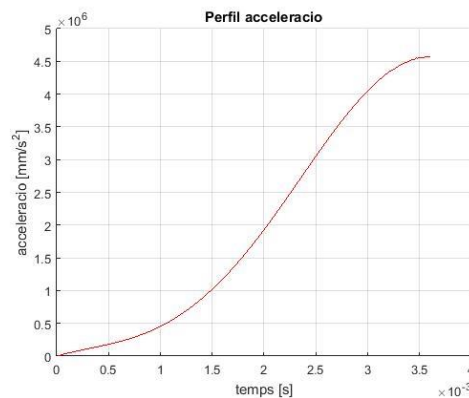


Fig. 36. Gràfic acceleració temps

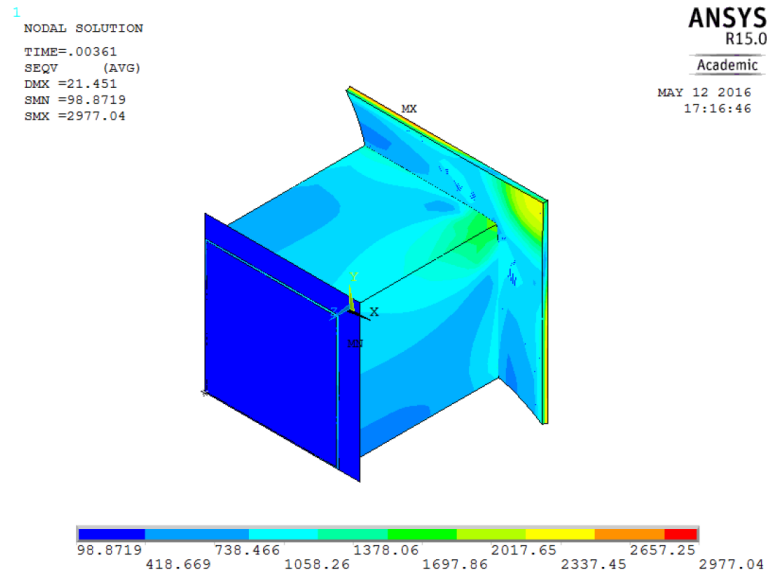


Fig. 37. Distribució de tensions equivalents

Observant la distribució de tensions es confirmen les previsions.

4.4.6. Gruix de 1 mm

Finalment, s'ha arribat al límit inferior de gruix de paret. La paret formada per resina armada amb fibra de carboni no podrà ser més prima que 1 mm, ja que no se'n disposen.

Tot i així, es vol determinar la diferència entre les tensions assolides amb el límit inferior de gruix de paret equivalent a 1 mm i la tensió de fluència del material, per tal de poder abordar de forma més fiable el següent disseny.

D'aquesta manera obtenim els valors mitjà i màxim de l'acceleració:

$$a_{mitjana} = 2037876,59 \frac{mm}{s^2} = 207,73 g$$

$$a_{màxima} = 3963137,32 \frac{mm}{s^2} = 403,99 g$$

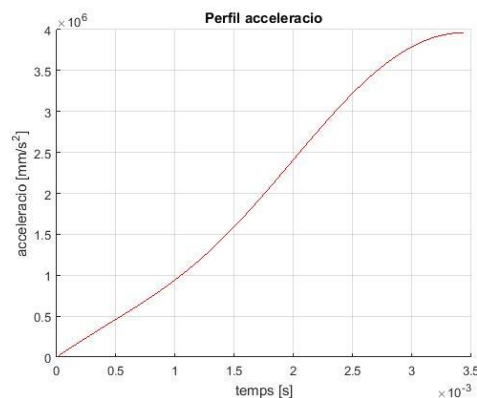


Fig. 38. Gràfic acceleració temps

Trobant-se novament aquests fora de normativa. Tot i així, observem ja un comportament diferent en l'acceleració. Aquesta creix més ràpidament al principi per després acabar en un valor més baix al final de l'impacte. És per això que l'acceleració màxima ha disminuït, però la mitjana és molt semblant a la de les altres simulacions.

Pel que fa a la distribució de tensions a l'instant final de l'impacte, resulta molt interessant notar que ja gairebé s'entra dins del règim plàstic. Malauradament no es disposa de làmines de resina armada amb fibra de carboni més primes que 1 mm.

D'aquesta manera, s'haurà de redissenyar la geometria del model per tal de reduir l'àrea perpendicular a la direcció de xoc, fet que farà augmentar les tensions a la resina reforçada amb fibra de carboni i deformar-lo plàsticament.

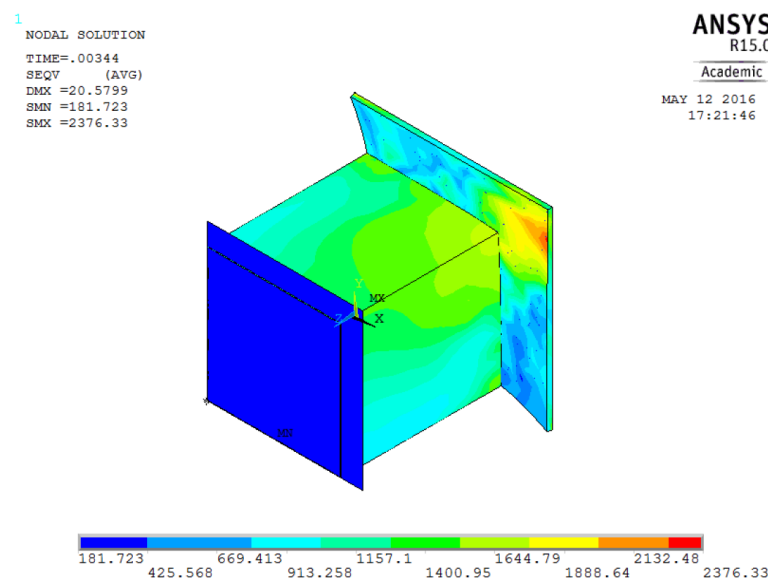


Fig. 39. Distribució de tensions equivalents

4.4.7. Comparació de perfils de velocitats i acceleracions

Seguidament es presenta una comparació del perfil de velocitats de les simulacions realitzades amb aquesta nova geometria.

S'observa que el perfil de velocitats és idèntic en tots els casos excepte la última simulació, en la qual la resina reforçada amb fibra de carboni assoleix una deformació elàstica més gran.

De la mateixa manera, el perfil d'acceleracions és molt semblant en tots els casos menys en la simulació d'1 mm de gruix de paret. En aquest últim, l'acceleració té un comportament relativament més suau, assolint un mateix valor d'acceleració mitjana, donat que els instants finals d'impacte són molt semblants tots. Tanmateix, el valor d'acceleració màxima ha disminuït sensiblement respecte al de les altres simulacions.

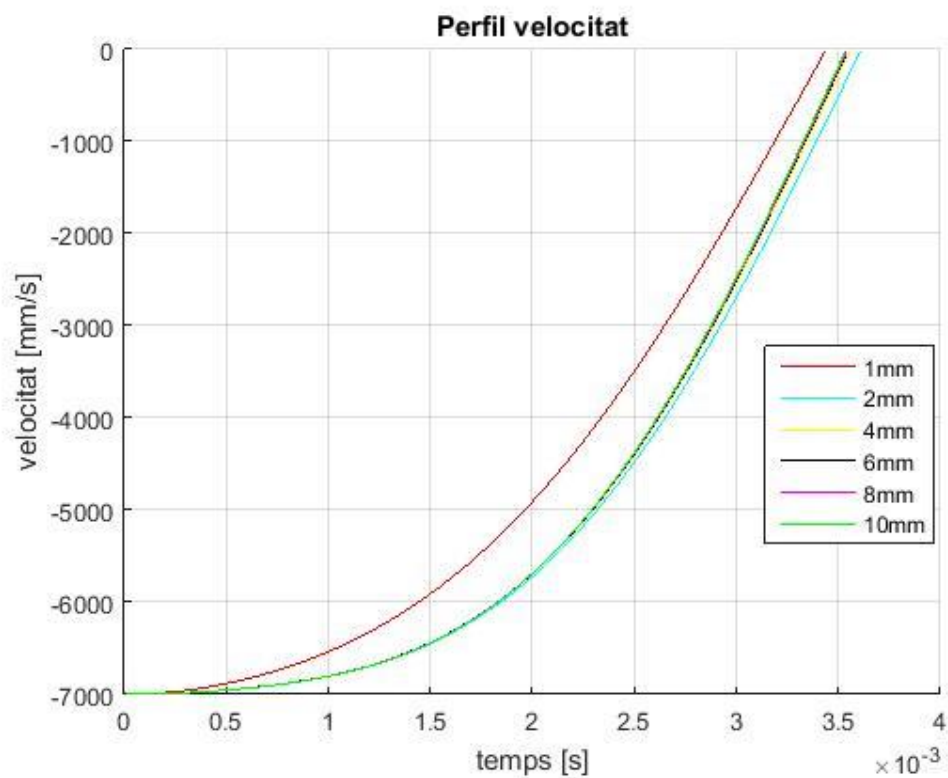


Fig. 40. Gràfic comparatiu de les velocitats

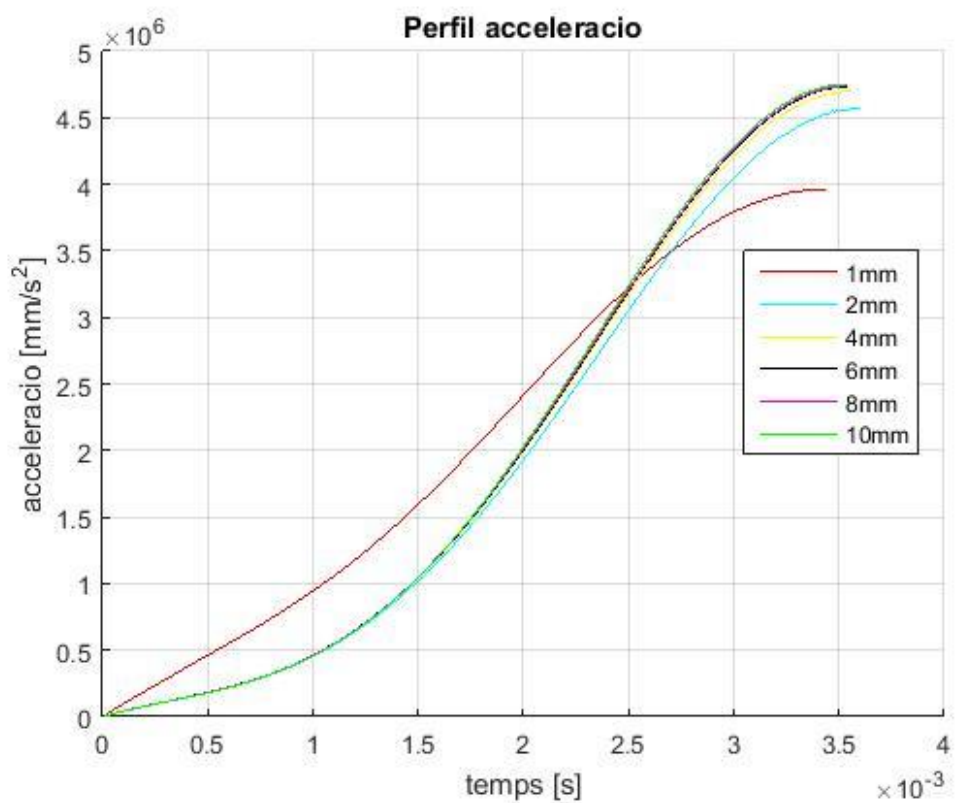


Fig. 41. Gràfic comparatiu de les acceleracions

5. Segon disseny

Els resultats obtinguts de l'anàlisi del primer model indicaven que el material absorbidor d'energia, la resina armada amb fibra de carboni, no assoliria en cap moments tensions que el fessin entrar en règim plàstic. D'aquesta manera, la següent iteració en la fase de disseny tractarà de reduir la secció transversal per incrementar els valors de les tensions equivalents de Von Mises i deformar el material de forma plàstica.

Per tal d'efectuar aquesta reducció s'ha eliminat la creu interior, quedant d'aquesta manera un prisma rectangular sense bases. El procés d'optimització serà idèntic al de l'anàlisi del primer disseny: es buscarà la geometria que compleixi els requeriments i que a la vegada sigui més lleugera. Es disposarà de làmines de resina reforçada amb fibra de carboni [4.2.2], amb un gruix mínim d'1 mm.

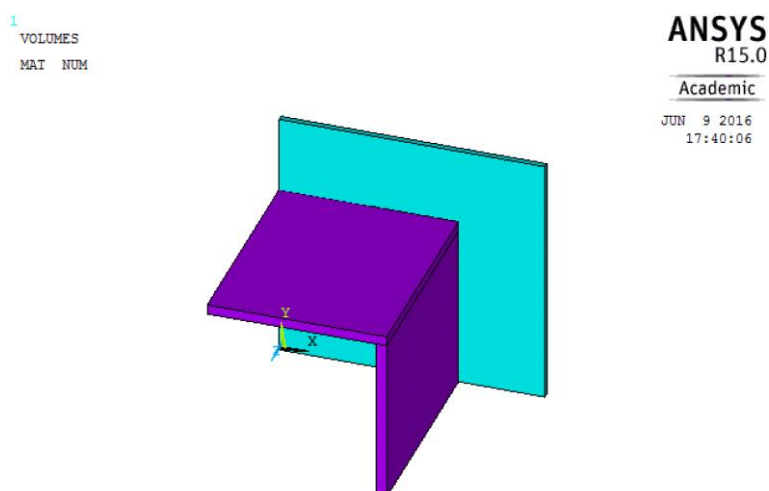


Fig. 42. Geometria del segon disseny

La reducció d'àrea transversal efectuada redueix notablement la rigidesa de l'estructura. Es preveu que un gruix de paret molt fi podria fer que les parets de resina assolissin la tensió crítica de vinclament, i per tant, deixessin de treballar de forma òptima, al desestabilitzar l'estructura.

Per determinar el gruix mínim que garanteixi que la resina entri abans en règim de deformació plàstica a que comenci a vinclar, s'efectuarà un anàlisi de vinclament. Un cop trobat el gruix mínim, es procedirà a l'anàlisi complet de l'impacte.

5.1. Anàlisi de vinclament

El programari ANSYS ens permet realitzar un anàlisi estructural de vinclament. Com a sortida, ens donarà el mode de vinclament juntament amb el valor de tensió que ha d'assolir un punt de l'estructura per entrar en règim inestable.

Per tal d'aconseguir directament el valor de la tensió que farà entrar en vinclament, es treballarà amb forces i pressions unitàries, aplicades només a la estructura formada per la resina. La placa d'alumini no juga cap paper en aquest anàlisi. A la figura 43 es mostra la geometria utilitzada en aquest cas.

1
ELEMENTS

ANSYS
R15.0

Academic

JUN 9 2016
17:50:08

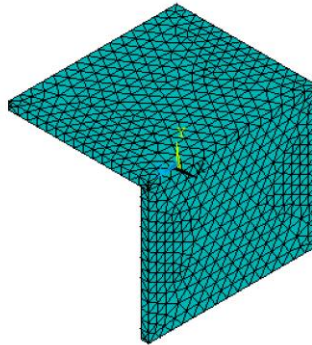


Fig. 43. Geometria mallada emprada en l'anàlisi de vinclament

5.1.1. Condicions de contorn

Les condicions de contorn imposades han de garantir un treball igual de l'estructura de resina igual al d'un impacte. Per tant, es fixarà primer la condició de geometria a les superfícies dels plans de geometria.

En segon lloc, per simular els esforços de compressió que rep la resina durant l'impacte i obtenir el resultat de la tensió crítica de vinclament, s'aplicarà una pressió de compressió a una cara, mentre que l'oposada serà fixe el seu desplaçament en la direcció de l'impacte, en el nostre cas la Z.

1
VOLUMES
TYPE NUM
0

ANSYS
R15.0

Academic

JUN 9 2016
17:56:43

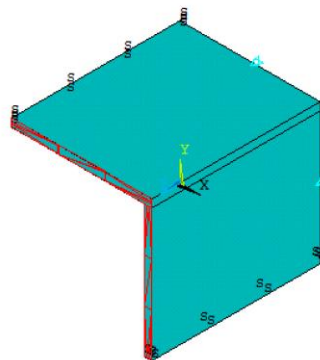


Fig. 44. Condicions de contorn

5.1.1. Determinació gruix mínim

Per tal de poder observar el comportament de la tensió crítica de vinclament al variar el gruix de paret, es realitzarà l'anàlisi de gruix 3, 4, 6 i 7 mm.

Els resultats obtinguts es mostren a la següent taula:

Gruix de paret [mm]	Tensió crítica de vinclament [MPa]
3	320,5
4	452,8
6	1246,2
7	1482,8

La tensió de fluència de la resina reforçada amb fibra de carboni es de 1400 MPa, per tant, el gruix de paret mínim per tal que es compleixi que la tensió crítica de vinclament és de 1400 MPa es de 7 mm.

Seguidament cal comprovar si amb un gruix de 7 mm l'absorbidor d'impactes complirà els requeriments imposats per normativa.

5.1. Anàlisi de l'impacte

Per realitzar aquest anàlisi es procedirà de la mateixa manera que als anteriors dissenys de l'absorbidor d'impactes. Les condicions de contorn i de l'anàlisi estan descrites a l'apartat [4.3].

Per procedir a l'anàlisi de resultats es presentaran els perfils de velocitat i acceleració de la massa, així com també la distribució de tensions a la placa d'alumini al moment de velocitat 0 de la massa, que correspon amb el moment més crític per a la placa. Finalment, es donarà el valor de desplaçament màxim en la direcció Z de la placa.

Recordem que, per normativa, s'ha de complir que el desplaçament màxim de qualsevol punt de la placa no pot superar els 25,4 mm i l'acceleració mitjana de la massa ha de ser inferior als 20g i el pic màxim no pot superar els 40g.

A la figura 45 trobem el gràfic velocitat de la massa en funció del temps. D'aquest s'extreu que la massa queda aturada, i per tant finalitza l'impacte, a l'instant 3,54 ms. Amb aquest valor podrem calcular l'acceleració mitja i el pic màxim d'acceleracions a partir del gràfic de l'acceleració, ja que podrem determinar on finalitza l'impacte.

D'aquesta manera obtenim els valors mitjà i màxim de l'acceleració:

$$a_{mitjana} = 1969949,46 \frac{mm}{s^2} = 200,81 g$$
$$a_{màxima} = 4809945,82 \frac{mm}{s^2} = 490,31 g$$

Per tant, observem que els dos valors estan molt per damunt del que permet la normativa.

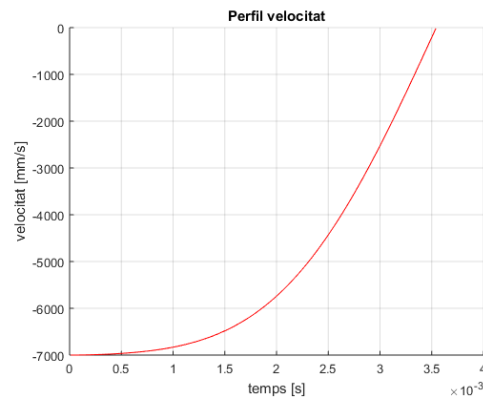


Fig. 45. Gràfic velocitat-temps

Finalment, tot i que es descarta aquest model, es comprova la deformació plàstica de la resina armada amb fibra de carboni al moment final de l'impacte, és a dir quan la massa té velocitat nul·la.

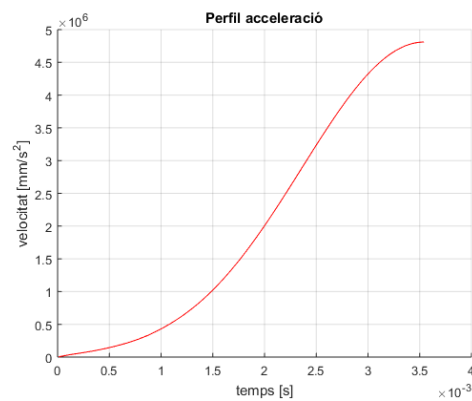


Fig. 46. Gràfic acceleració temps

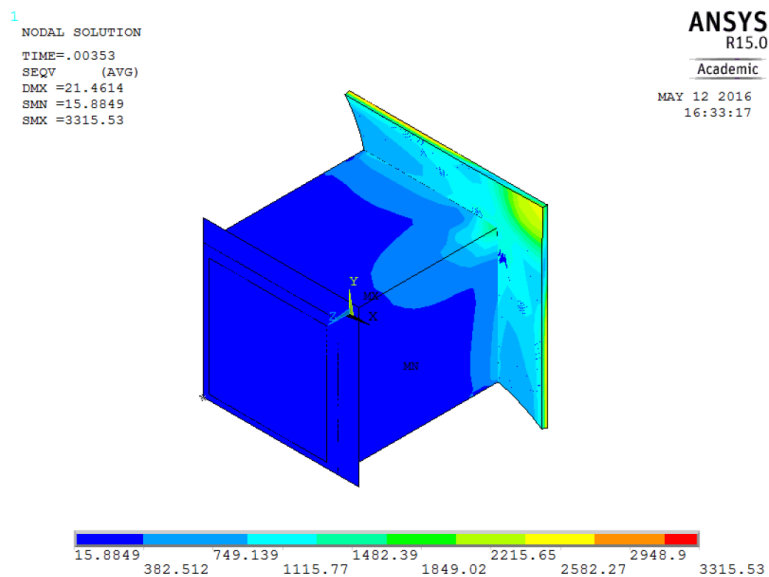


Fig. 47. Distribució de tensions equivalents

1. NODAL SOLUTION
 TIME=.00355
 SEQV (AVG)
 DMX =23.0633
 SMN =49.2985
 SMX =3086.98

ANSYS
 R15.0
 Academic
 JUN 8 2016
 19:30:46

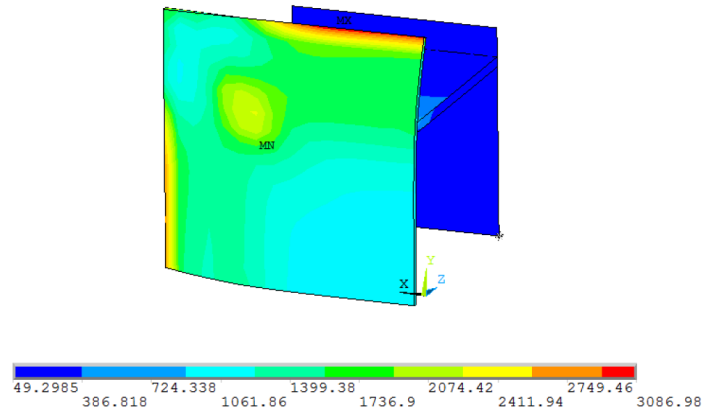


Fig. 48. Distribució de tensions equivalents

Observant els resultats s'arriba a la conclusió que no s'aconsegueix cap millora respecte a l'anterior model. Bàsicament, l'atenuador d'impactes presenta el mateix comportament, ja que la resina reforçada amb fibra de carboni, al no entrar en règim plàstic, actua simplement traspasant les tensions a la placa d'alumini. Per tant, al ser la placa d'alumini idèntica en els dos casos, el comportament de l'estructura enfront de l'impacte segueix sent el mateix.

6. Futurs dissenys

A partir dels anteriors anàlisis s'ha determinat que el principal problema per dissenyar un atenuador d'impactes emprant resina reforçada amb fibra de carboni és aconseguir que aquesta última assoleixi uns valors de tensió que la facin entrar en zona de deformació plàstica. En els anteriors casos, l'estructura absorbidora d'energia assoleix abans la tensió crítica de vinclament que la de fluència. Per tant, es produeix una gran inestabilitat que no permet el bon treball de l'element atenuador d'impactes.

Per tal de poder assolir un atenuador d'impactes que compleixi amb els requeriments imposats per normativa, cal aconseguir que la resina reforçada amb fibra de carboni es deformi plàsticament, i així absorbeixi energia. D'aquesta manera, la geometria definitiva tindrà dues restriccions:

1. En primer lloc, l'àrea transversal de l'estructura absorbidora d'energia, implementada amb resina reforçada amb fibra de carboni, tindrà un límit superior, donat per la tensió de fluència.

$$\{ A_t < A_{lim} \mid \exists t : \sigma > \sigma_y \}$$

2. D'altra banda, el moment d'inèrcia de les parets de l'estructura absorbidora d'energia tindrà un límit inferior, per tal d'evitar que aquesta última entri en vinclament abans de fluir plàsticament.

$$\{ I_{paret} > I_{min} \mid \forall t : \sigma < \sigma_{vincl} \}$$

Bàsicament, el que caldrà fer es trobar una estructura prou esvelta, pel que fa a l'àrea transversal, i que alhora sigui prou robusta en quan al vinclament.

6.1. Proposta per al següent disseny

Per a la següent iteració, es proposa un disseny que incrementa notablement el moment d'inèrcia de la paret, sense augmentar significativament l'àrea transversal.

Considerem l'eix Z com el longitudinal del vehicle, és a dir la direcció de l'impacte, i el pla X-Y com el d'una secció transversal, perpendicular a la direcció de l'impacte. Les parets de l'estructura absorbidora d'energia intersecaran el pla de secció X-Y en forma d'ona. D'aquesta manera, l'àrea serà una mica més gran que si ho fes en forma recta, però el moment d'inèrcia augmentarà molt més.

Així doncs, es planteja canviar les parets de l'estructura absorbidora d'energia, anteriorment planes, per una geometria ondulada semicircular, amb un diàmetre de 10 mm.

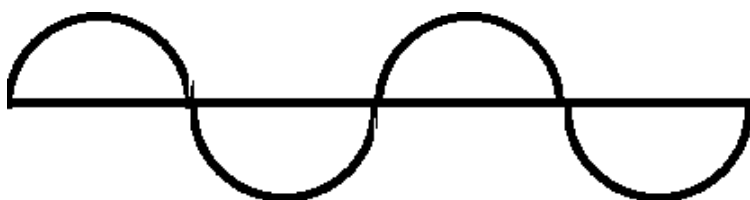


Fig. 49. Secció paret en pla X-Y

7. Conclusions

En primer lloc, els objectius plantejats a l'inici no han estat plenament complerts, principalment, perquè no s'ha trobat cap combinació de material i geometria que complís amb els requeriments imposats per la normativa publicada per la SAE l'any 2016 en referència a la competició Formula Student. D'altra banda, aquest present treball pot ser continuat fins a trobar amb un disseny de l'atenuador d'impactes satisfactori en quant a normativa i que optimitzi l'actual disseny en quan a la lleugeresa. Per tant, només es procedirà a les conclusions parcials.

En quant al disseny actual, s'ha trobat que la simulació realitzada mitjançant el Mètode dels Elements Finites (FEM) porta a uns resultats que, un cop analitzats, evidencien que l'atenuador d'impactes no compleix amb els requeriments imposats per la normativa de l'any 2016. Aquest fet pot ser atribuït a diverses fonts d'error: per una part, pot ser que la modelització del model no hagi estat la més adequada, degut a una simplificació excessiva d'aquest, tan pel que fa a la geometria com a les característiques mecàniques equivalents assignades al material. Recordem que en l'anàlisi del model actual, l'estructura absorbidora d'impactes estava conformada per alumini en forma de honeycomb, que s'ha modelat com un material continu amb unes propietats elàstiques diferents, aquestes últimes extretes d'un sol experiment. D'altra banda, les connexions entre l'estructura absorbidora d'energia i la placa, i entre la placa i el xassís, han estat molt simplificades. Tot i així, els resultats estaven molt a prop d'entrar dins de valors admissibles.

La segona part del present treball consistia en determinar la possibilitat de construir un atenuador d'impactes amb un material compost més lleuger, la resina reforçada amb fibra de carboni, i que alhora presentés millors propietats mecàniques. Degut a restriccions temporals no s'ha trobat cap atenuador que complís, però s'ha deixat la porta oberta per a seguir amb la recerca, ja que no hi ha cap indicador que mostri que no és possible. Per tant, es qüestió de trobar una geometria que millori les anteriors, com la mostrada en l'apartat [6.1.].

8. Bibliografia

ANSYS, I. (2015). ANSYS® Academic Research, Release 15.0.

Dill, E. (2011). The Finite Element Method for Mechanics of Solids with ANSYS Applications.

Erdogan Madenci, I. G. (2015). The Finite Element Method and Applications in Engineering Using ANSYS.

Han Zhao, G. G. (1998). Crushing behaviour fo aluminium honeycombs under impact loading. *International Journal of Impact Engineering*, 827-836.

LI Ru-zhong (Institute of Electronic Engineering, C. A. (2008). Analysis of system of units in Ansys. *Machinery Design & Manufacture*.

M. Peel, A. S. (2003). Microstructure, mechanical properties and residual stresses as a function of welding speed in aluminium AA5083 friction stir welds. *Acta Materialia*, 4791-4801.

MathWorks. (2015). MATLAB R2015a.

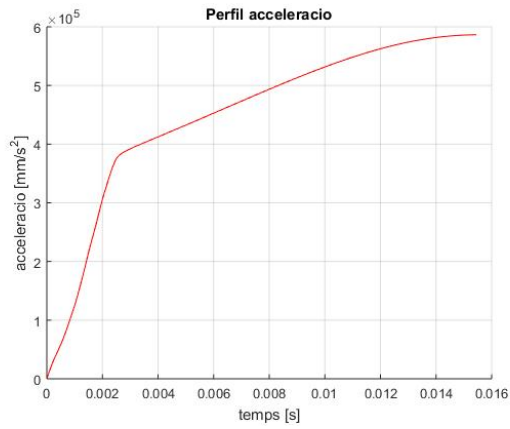
Plantema, F. J. (1966). Sandwich construction.

ANNEX

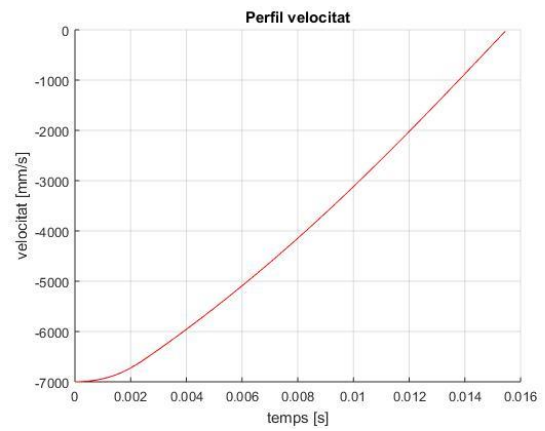
Simulacions

Model actual

Gràfics representatius del moment final de l'impacte



Gràfica de l'acceleració de la massa

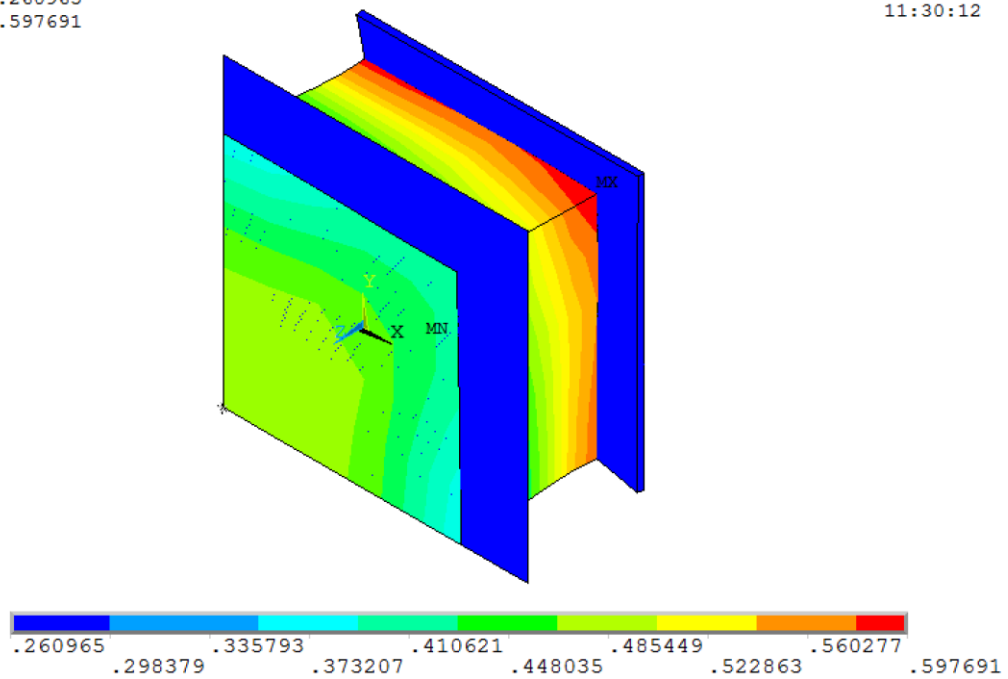


Gràfica de la velocitat de la massa

1
NODAL SOLUTION
TIME=.0155
EPPLQV (AVG)
DMX =74.5897
SMN =.260965
SMX =.597691

ANSYS
R15.0
Academic

MAY 12 2016
11:30:12

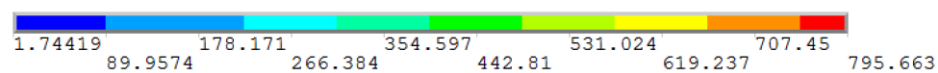
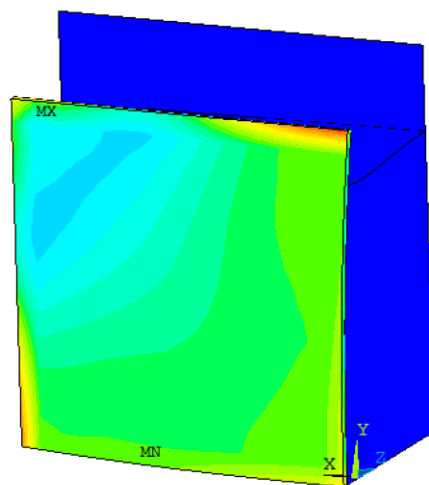


Deformació elàstica del model

1
NODAL SOLUTION
TIME=.0155
SEQV (AVG)
DMX =74.5897
SMN =1.74419
SMX =795.663

ANSYS
R15.0
Academic

MAY 12 2016
11:31:33

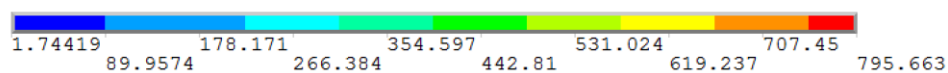
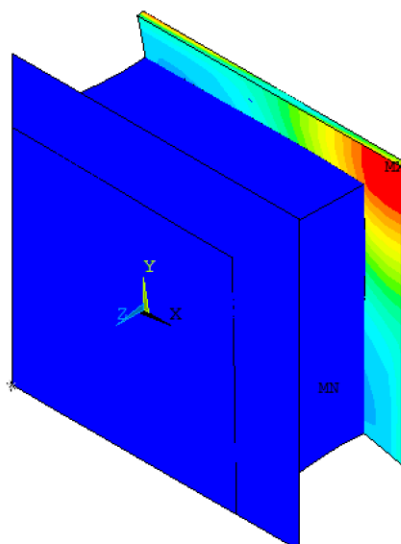


Tensió equivalent de Von Mises

1
NODAL SOLUTION
TIME=.0155
SEQV (AVG)
DMX =74.5897
SMN =1.74419
SMX =795.663

ANSYS
R15.0
Academic

MAY 12 2016
11:29:27



Tensió equivalent de Von Mises

Fitxer de comandes

```

/BATCH
! /COM,ANSYS
RELEASE 15.0.7
UP20140420
10:54:21
05/12/2016
/input,menust,tmp
,'
! /GRA,POWER
! /GST,ON
! /PLO,INFO,3
! /GRO,CURL,ON
! /CPLANE,1
! /REPLOT,RESIZE
WPSTYLE,,,,,,,,0
!*
/NOPR
KEYW,PR_SET,1
KEYW,PR_STRUC,1
KEYW,PR_THERM,0
KEYW,PR_FLUID,0
KEYW,PR_ELMAG,0
KEYW,MAGNOD,0
KEYW,MAGEDG,0
KEYW,MAGHFE,0
KEYW,MAGELC,0
KEYW,PR_MULTI,0
/GO
!*
! /COM,
!
/COM,Preferences
for GUI filtering
have been set to
display:
! /COM,
Structural
!*
/PREP7
!*
ET,1,SOLID185
!*
ET,2,MASS21
!*
!*
R,1,, ,0.075, ,
, ,
!*
!*
MPTEMP,,,,,,,,
MPTEMP,1,0

MPDATA,EX,1,,6900
0
MPDATA,PRXY,1,,
MPTEMP,,,,,,,,
MPTEMP,1,0
MPDATA,EX,2,,175
MPDATA,PRXY,2,,
TB,BISO,2,1,2,
TBTEMP,0
TBDATA,,1.75,0.01
,,,,
K,1,0,0,0,
K,2,0,0,4,
K,3,185,0,4,
K,4,185,0,0,
K,5,185,180,0,
! /VIEW,1,1,1,1
! /ANG,1
! /REP,FAST
K,6,185,180,4,
K,7,0,180,4,
K,8,0,180,0,
K,8,0,180,0,
V, , 2,
1, , 4,
3, , 7,
8, , 5,
6
! /VIEW,1,1,1,1
! /ANG,1
! /REP,FAST
! VPLOT
K,9,125,0,4,
K,10,125,0,154,
K,11,0,0,154,
K,12,0,125,154,
K,13,0,125,4,
K,13,125,125,4,
K,14,0,125,4,
K,115,125,125,4,
K,115,125,125,154
,
K,115,125,125,154
,
GPLOT
V, , 11,
12, , 115,
10, , 2,
14, , 13,
9
K,116,145,145,154
,

K,117,145,0,154,
K,118,0,145,154,
K,118,0,145,154,
FLST,2,4,3
FITEM,2,11
FITEM,2,118
FITEM,2,116
FITEM,2,117
A,P51X
CM,_Y,VOLU
VSEL, , , ,
2
CM,_Y1,VOLU
CMSEL,S,_Y
!*
CMSEL,S,_Y1
VATT, , 2,
1, , 1, , 0
CMSEL,S,_Y
CMDELE,_Y
CMDELE,_Y1
!*
MSHAPE,0,3D
MSHKEY,1
!*
CM,_Y,VOLU
VSEL, , , ,
2
CM,_Y1,VOLU
CHKMSH,'VOLU'
CMSEL,S,_Y
!*
VMESH,_Y1
!*
CMDELE,_Y
CMDELE,_Y1
CMDELE,_Y2
!*
CM,_Y,VOLU
VSEL, , , ,
1
CM,_Y1,VOLU
CMSEL,S,_Y
!*
CMSEL,S,_Y1
VATT, , 1,
1, , 1, , 0
CMSEL,S,_Y
CMDELE,_Y
CMDELE,_Y1
!*
CM,_Y,VOLU

```

```

VSEL, , , ,
1
CM,_Y1,VOLU
CMSEL,S,_Y
!*
CMSEL,S,_Y1
VATT, , 1,
1, 1, 0
CMSEL,S,_Y
CMDELE,_Y
CMDELE,_Y1
!*
CM,_Y,VOLU
VSEL, , , ,
1
CM,_Y1,VOLU
CHKMSH,'VOLU'
CMSEL,S,_Y
!*
VMESH,_Y1
!*
CMDELE,_Y
CMDELE,_Y1
CMDELE,_Y2
!*
! /MREP,EPLT
CM,_Y,KP
KSEL, , , ,
11
CM,_Y1,KP
CMSEL,S,_Y
!*
CMSEL,S,_Y1
KATT, , 1,
1, 2, 0
CMSEL,S,_Y
CMDELE,_Y
CMDELE,_Y1
!*
KMESH, 11
! EPLT
!*
!*
!*
! /COM, CONTACT
PAIR CREATION -
START
CM,_NODECM,NODE
CM,_ELEMCM,ELEM
CM,_KPCM,KP
CM,_LINECM,LINE
CM,_AREACM,AREA
CM,_VOLUCM,VOLU
!
/GSAV,cwz,gsav,,t
emp

```

```

MP,MU,1,
MAT,1
R,3
REAL,3
ET,3,170
ET,4,174
KEYOPT,4,9,0
KEYOPT,4,10,2
R,3,
RMORE,
RMORE,,0
RMORE,0
! Generate the
target surface
ASEL,S,,,13
CM,_TARGET,AREA
AATT,-1,3,3,-1
TYPE,3
AMESH,ALL
! Create a pilot
node
TSHAP,PILO
E,1
! Generate the
contact surface
ASEL,S,,,7
CM,_CONTACT,AREA
TYPE,4
NSLA,S,1
ESLN,S,0
NSLE,A,CT2 !
CZMESH patch (fsk
qt-40109 8/2008)
ESURF
*SET,_REALID,3
ALLSEL
ESEL,ALL
ESEL,S,TYPE,,3
ESEL,A,TYPE,,4
ESEL,R,REAL,,3
ASEL,S,REAL,,3
! /PSYMB,ESYS,1
! /PNUM,TYPE,1
! /NUM,1
! EPLT
ESEL,ALL
ESEL,S,TYPE,,3
ESEL,A,TYPE,,4
ESEL,R,REAL,,3
ASEL,S,REAL,,3
CMSEL,A,_NODECM
CMDEL,_NODECM
CMSEL,A,_ELEMCM
CMDEL,_ELEMCM
CMSEL,S,_KPCM
CMDEL,_KPCM

```

```

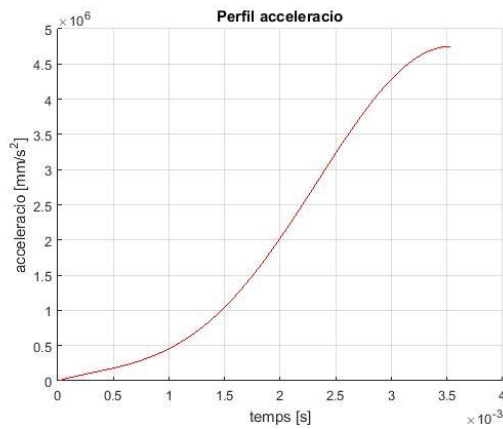
CMSEL,S,_LINECM
CMDEL,_LINECM
CMSEL,S,_AREACM
CMDEL,_AREACM
CMSEL,S,_VOLUCM
CMDEL,_VOLUCM
! /GRES,cwz,gsav
CMDEL,_TARGET
CMDEL,_CONTACT
! /COM, CONTACT
PAIR CREATION -
END
!*
!*
! /COM, CONTACT
PAIR CREATION -
START
CM,_NODECM,NODE
CM,_ELEMCM,ELEM
CM,_KPCM,KP
CM,_LINECM,LINE
CM,_AREACM,AREA
CM,_VOLUCM,VOLU
!
/GSAV,cwz,gsav,,t
emp
MP,MU,1,0
MAT,1
R,4
REAL,4
ET,5,170
ET,6,174
KEYOPT,6,9,0
KEYOPT,6,10,2
R,4,
RMORE,
RMORE,,0
RMORE,0
! Generate the
target surface
ASEL,S,,,5
CM,_TARGET,AREA
TYPE,5
NSLA,S,1
ESLN,S,0
ESLL,U
ESEL,U,ENAME,,188
,189
NSLE,A,CT2
ESURF
CMSEL,S,_ELEMCM
! Generate the
contact surface
ASEL,S,,,12
CM,_CONTACT,AREA
TYPE,6

```

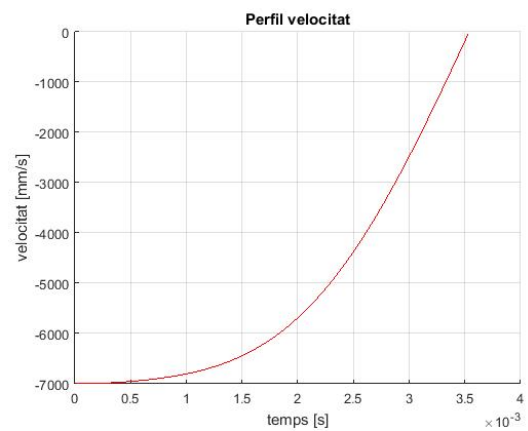
NSLA,S,1	! /MREP,EPLT	, -0.614886524508
ESLN,S,0	GPLOT	, 0.531834375507
NSLE,A,CT2 !	FINISH	! /ANG, 1, -
CZMESH patch (fsk	/SOL	13.2734895381
qt-40109 8/2008)	!*	! /REPLO
ESURF	ANTYPE,4	FLST,2,4,5,ORDE,4
ALLSEL	!*	FITEM,2,1
ESEL,ALL	TRNOPT,FULL	FITEM,2,-2
ESEL,S,TYPE,,5	LUMPM,0	FITEM,2,8
ESEL,A,TYPE,,6	!*	FITEM,2,11
ESEL,R,REAL,,4	ANTYPE,4	DA,P51X,SYMM
! /PSYMB,ESYS,1	NLGEOM,1	! /VIEW,1,1,1,1
! /PNUM,TYPE,1	NSUBST,10000,1000	! /ANG,1
! /NUM,1	0,10000	! /REP,FAST
! EPLT	OUTRES,ERASE	FLST,2,2,4,ORDE,2
ESEL,ALL	OUTRES,NSOL,5	FITEM,2,8
ESEL,S,TYPE,,5	OUTRES,V,5	FITEM,2,-9
ESEL,A,TYPE,,6	OUTRES,A,5	!*
ESEL,R,REAL,,4	OUTRES,STRS,5	/GO
CMSEL,A,_NODECM	OUTRES,EPEL,5	DL,P51X, ,ALL,
CMDEL,_NODECM	OUTRES,EPPL,5	FLST,2,1,1,ORDE,1
CMSEL,A,_ELEMCM	RESCONTRL,DEFINE,	FITEM,2,1
CMDEL,_ELEMCM	ALL,5,1	!*
CMSEL,S,_KPCM	TIME,0.02	/GO
CMDEL,_KPCM	! VPLOT	D,P51X, , , , ,
CMSEL,S,_LINECM	! /USER, 1	,UX,UY,ROTX,ROTY,
CMDEL,_LINECM	! /VIEW, 1, -	ROTZ,
CMSEL,S,_AREACM	0.717701651109	FLST,2,1,1,ORDE,1
CMDEL,_AREACM	,	FITEM,2,1
CMSEL,S,_VOLUCM	0.405030120770E-	IC,P51X,UZ, , -
CMDEL,_VOLUCM	01,	7000,
! /GRES,cwz,gsav	0.695171810424	GPLOT
CMDEL,_TARGET	! /ANG, 1, -	! /STATUS,SOLU
CMDEL,_CONTACT	15.3251345134	SOLVE
! /COM, CONTACT	! /REPLO	
PAIR CREATION -	! /VIEW, 1, -	
END	0.582294392045	

Primer model (10mm)

Gràfics representatius del moment final de l'impacte



Gràfica de l'acceleració de la massa

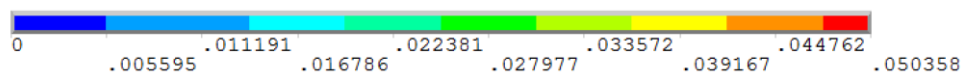
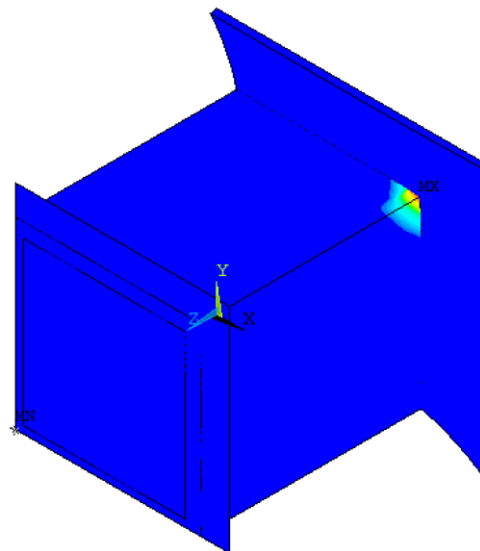


Gràfica de la velocitat de la massa

1
NODAL SOLUTION
TIME=.00353
EPPLEQV (AVG)
DMX =21.4614
SMX =.050358

ANSYS
R15.0
Academic

MAY 12 2016
16:31:42



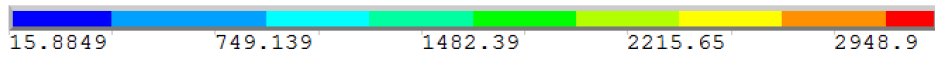
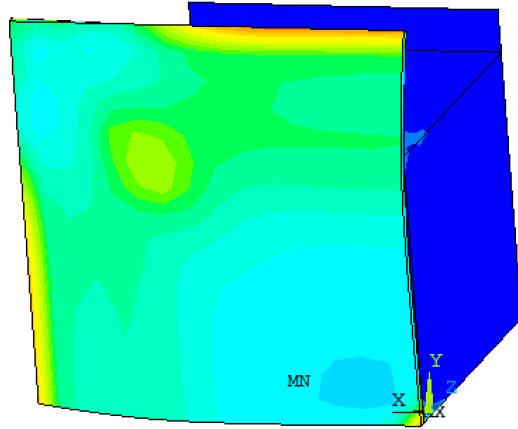
Deformació plàstica del model

1

NODAL SOLUTION
TIME=.00353
SEQV (AVG)
DMX =21.4614
SMN =15.8849
SMX =3315.53

ANSYS
R15.0
Academic

MAY 12 2016
16:37:00

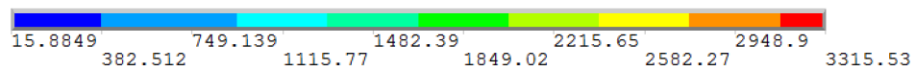
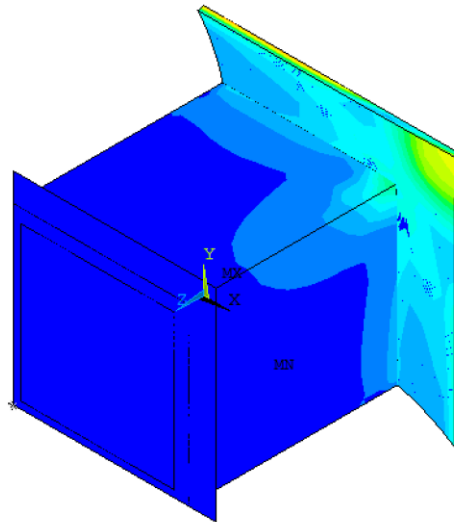


1

NODAL SOLUTION
TIME=.00353
SEQV (AVG)
DMX =21.4614
SMN =15.8849
SMX =3315.53

ANSYS
R15.0
Academic

MAY 12 2016
16:33:17



Tensió equivalent de Von Mises

Fitxer de comandes

/BATCH	K,10,0,0,154,	35,	33,
/input,menust,tmp	K,10,0,0,154,	31,	23,
, ''	K,11,125,0,154,	34	
WPSTYLE,,,,,,,,0	K,11,125,0,4,	FLST,2,4,6,ORDE,2	
/NOPR	K,12,125,0,154,	FITEM,2,2	
KEYW,PR_SET,1	K,12,125,0,154,	FITEM,2,-5	
KEYW,PR_STRUC,1	K,13,0,5,4,	VGLUE,P51X	
KEYW,PR_THERM,0	K,14,125,5,4,	GPLOT	
KEYW,PR_FLUID,0	K,15,125,5,154,	K,32,145,145,154,	
KEYW,PR_ELMAG,0	K,16,0,5,154,	K,33,0,145,154,	
KEYW,MAGNOD,0	K,16,0,5,154,	K,34,145,0,154,	
KEYW,MAGEDG,0	V, 10,	K,34,145,0,154,	
KEYW,MAGHFE,0	12, 11,	FLST,2,4,3	
KEYW,MAGELC,0	2, 16,	FITEM,2,11	
KEYW,PR_MULTI,0	15, 14,	FITEM,2,33	
/GO	13	FITEM,2,32	
/PREP7	K,20,115,5,154,	FITEM,2,34	
ET,1,SOLID185	K,21,115,5,4,	A,P51X	
ET,2,MASS21	K,22,115,125,4,	GPLOT	
ET,3,MASS21	K,22,125,125,4,	FLST,5,4,6,ORDE,2	
ETDEL,3	K,23,115,125,4,	FITEM,5,5	
R,1, , ,0.075, ,	K,24,125,125,154,	FITEM,5,-8	
, ,	K,24,115,125,154,	CM,_Y,VOLU	
MPTEMP,,,,,,,,	K,24,115,125,154,	VSEL, , , ,P51X	
MPTEMP,1,0	GPLOT	CM,_Y1,VOLU	
MPDATA,EX,1,,6900	K,25,125,125,154,	CMSSEL,S,_Y	
0	V, 15,	CMSEL,S,_Y1	
MPDATA,PRXY,1,,	20, 21,	VATT, 2,	
MPTEMP,,,,,,,,	14, 25,	1, 1, 0	
MPTEMP,1,0	24, 23,	CMSEL,S,_Y	
MPDATA,EX,2,,1800	22	CMDELE,_Y	
00	K,26,5,5,154,	CMDELE,_Y1	
MPDATA,PRXY,2,,	K,27,5,125,154,	FLST,5,4,6,ORDE,2	
TB,BISO,2,1,2,	K,28,0,125,154,	FITEM,5,5	
TBTEMP,0	GPLOT	FITEM,5,-8	
TBDATA,,1400,1800	K,30,5,5,154,	CM,_Y,VOLU	
, , , ,	K,30,5,5,4,	VSEL, , , ,P51X	
K,1,0,0,0,	K,30,5,5,4,	CM,_Y1,VOLU	
K,2,0,0,4,	GPLOT	CHKMSH,'VOLU'	
K,3,185,0,0,	K,31,5,125,4,	CMSEL,S,_Y	
K,3,185,0,4,	K,32,0,125,4,	VSWEEP,_Y1	
K,4,185,0,0,	K,32,0,125,4,	CMDELE,_Y	
K,4,185,0,0,	V, 26,	CMDELE,_Y1	
K,5,185,180,0,	16, 13,	CMDELE,_Y2	
K,6,185,180,4,	30, 27,	GPLOT	
K,7,0,180,4,	28, 32,	MSHAPE,1,3D	
K,8,0,180,0,	31	MSHKEY,0	
K,8,0,180,0,	K,33,5,115,4,	FLST,5,4,6,ORDE,2	
V, 2,	K,34,115,115,4,	FITEM,5,5	
1, 4,	K,35,115,115,154,	FITEM,5,-8	
3, 7,	K,36,5,115,154,	CM,_Y,VOLU	
8, 5,	K,36,5,115,154,	VSEL, , , ,P51X	
6	V, 36,	CM,_Y1,VOLU	
GPLOT	27, 24,	CHKMSH,'VOLU'	


```

CMSEL,S,_Y
VMESH,_Y1
CMDELE,_Y
CMDELE,_Y1
CMDELE,_Y2
CM,_Y,VOLU
VSEL,, , ,
1
CM,_Y1,VOLU
CMSEL,S,_Y
CMSEL,S,_Y1
VATT,1,1,0
CMSEL,S,_Y
CMDELE,_Y
CMDELE,_Y1
CM,_Y,VOLU
VSEL,, , ,
1
CM,_Y1,VOLU
CMSEL,S,_Y
CMSEL,S,_Y1
VATT,1,1,0
CMSEL,S,_Y
CMDELE,_Y
CMDELE,_Y1
CM,_Y,VOLU
VSEL,, , ,
1
CM,_Y1,VOLU
CHKMSH,'VOLU'
CMSEL,S,_Y
VMESH,_Y1
CMDELE,_Y
CMDELE,_Y1
CMDELE,_Y2
CM,_Y,KP
KSEL,, , ,
11
CM,_Y1,KP
CMSEL,S,_Y
CMSEL,S,_Y1
KATT,1,2,0
CMSEL,S,_Y
CMDELE,_Y
CMDELE,_Y1
KMESH,11
CM,_NODECM,NODE
CM,_ELEMCM,ELEM
CM,_KPCM,KP
CM,_LINECM,LINE
CM,_AREACM,AREA
CM,_VOLUCM,VOLU
MP,MU,1,

```

```

MAT,1
R,3
REAL,3
ET,4,170
ET,5,174
KEYOPT,5,9,0
KEYOPT,5,10,2
R,3,
RMORE,
RMORE,,0
RMORE,0
ASEL,S,,,7
CM,_TARGET,AREA
AATT,-1,3,4,-1
TYPE,4
AMESH,ALL
TSHAP,PILO
E,1812
ASEL,S,,,25
ASEL,A,,,32
ASEL,A,,,35
ASEL,A,,,38
CM,_CONTACT,AREA
TYPE,5
NSLA,S,1
ESLN,S,0
NSLE,A,CT2 !
CZMESH patch (fsk
qt-40109 8/2008)
ESURF
*SET,_REALID,3
ALLSEL
ESEL,ALL
ESEL,S,TYPE,,4
ESEL,A,TYPE,,5
ESEL,R,REAL,,3
ASEL,S,REAL,,3
ESEL,ALL
ESEL,S,TYPE,,4
ESEL,A,TYPE,,5
ESEL,R,REAL,,3
ASEL,S,REAL,,3
CMSEL,A,_NODECM
CMDEL,_NODECM
CMSEL,A,_ELEMCM
CMDEL,_ELEMCM
CMSEL,S,_KPCM
CMDEL,_KPCM
CMSEL,S,_LINECM
CMDEL,_LINECM
CMSEL,S,_AREACM
CMDEL,_AREACM
CMSEL,S,_VOLUCM
CMDEL,_VOLUCM
CMDEL,_TARGET
CMDEL,_CONTACT

```

```

CM,_NODECM,NODE
CM,_ELEMCM,ELEM
CM,_KPCM,KP
CM,_LINECM,LINE
CM,_AREACM,AREA
CM,_VOLUCM,VOLU
MP,MU,1,0
MAT,1
R,4
REAL,4
ET,6,170
ET,7,174
KEYOPT,7,9,0
KEYOPT,7,10,2
R,4,
RMORE,
RMORE,,0
RMORE,0
ASEL,S,,,5
CM,_TARGET,AREA
TYPE,6
NSLA,S,1
ESLN,S,0
ESLL,U
ESEL,U,ENAME,,188
,189
NSLE,A,CT2
ESURF
CMSEL,S,_ELEMCM
ASEL,S,,,30
ASEL,A,,,33
ASEL,A,,,36
ASEL,A,,,39
CM,_CONTACT,AREA
TYPE,7
NSLA,S,1
ESLN,S,0
NSLE,A,CT2 !
CZMESH patch (fsk
qt-40109 8/2008)
ESURF
ALLSEL
ESEL,ALL
ESEL,S,TYPE,,6
ESEL,A,TYPE,,7
ESEL,R,REAL,,4
ESEL,ALL
ESEL,S,TYPE,,6
ESEL,A,TYPE,,7
ESEL,R,REAL,,4
CMSEL,A,_NODECM
CMDEL,_NODECM
CMSEL,A,_ELEMCM
CMDEL,_ELEMCM
CMSEL,S,_KPCM
CMDEL,_KPCM

```

```

CMSEL,S,_LINECM
CMDEL,_LINECM
CMSEL,S,_AREACM
CMDEL,_AREACM
CMSEL,S,_VOLUCM
CMDEL,_VOLUCM
CMDEL,_TARGET
CMDEL,_CONTACT
GPLOT
FINISH
/SOL
ANTYPE,4
TRNOPT,FULL
LUMPM,0
ANTYPE,4
NLGEOM,1

```

```

NSUBST,2500,2500,
2500
OUTRES,ERASE
OUTRES,ALL,5
RESCONTRL,DEFINE,
ALL,5,1
TIME,0.005
FLST,2,5,5,ORDE,5
FITEM,2,1
FITEM,2,-2
FITEM,2,8
FITEM,2,11
FITEM,2,15
DA,P51X,SYMM
FLST,2,2,4,ORDE,2
FITEM,2,8

```

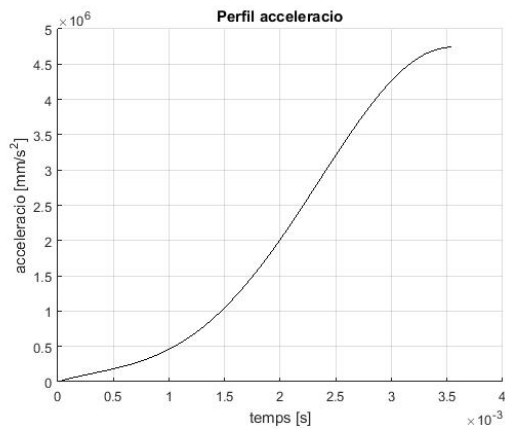
```

FITEM,2,-9
/GO
DL,P51X,,ALL,
FLST,2,1,1,ORDE,1
FITEM,2,1812
/GO
D,P51X,, , , , ,
,UX,UY,ROTX,ROTY,
ROTZ,
GPLOT
FLST,2,1,1,ORDE,1
FITEM,2,1812
IC,P51X,UZ, , -
7000,
SOLVE

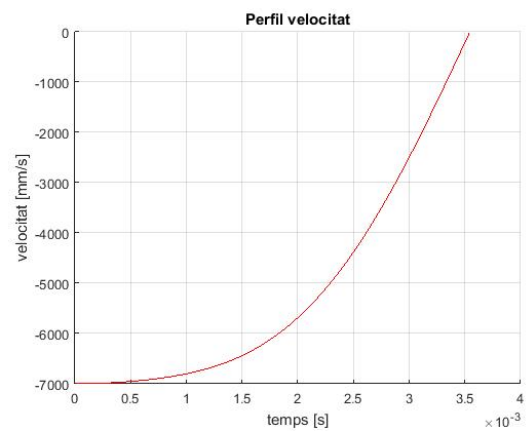
```

Primer model (8mm)

Gràfics representatius del moment final de l'impacte



Gràfica de l'acceleració de la massa



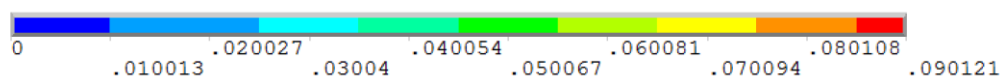
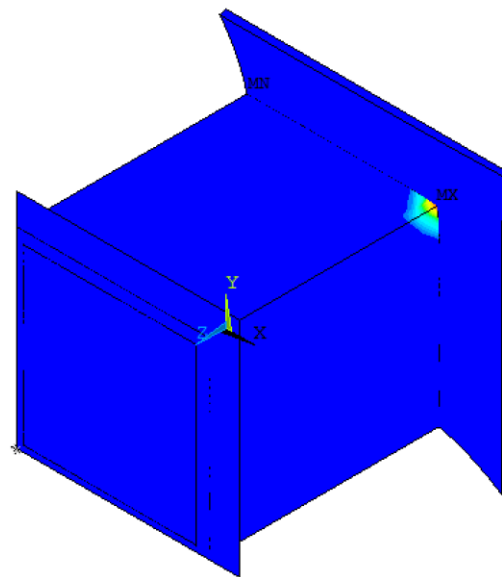
Gràfica de la velocitat de la massa

1

NODAL SOLUTION
TIME=.00354
EPPLEQV (AVG)
DMX =21.4756
SMX =.090121

ANSYS
R15.0
Academic

MAY 12 2016
16:46:37



Deformació plàstica del model

1

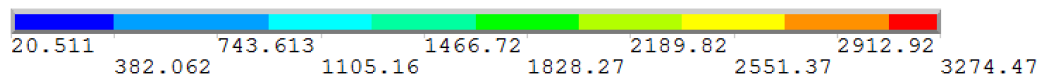
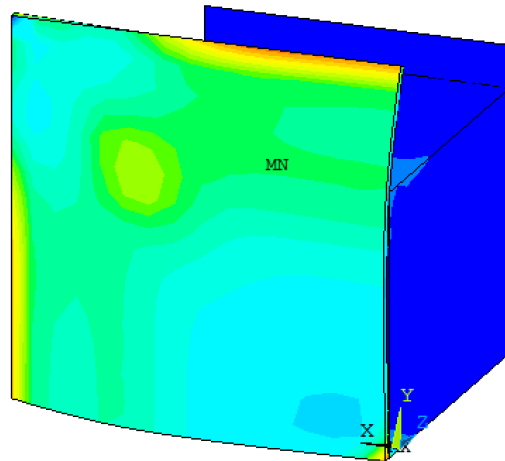
NODAL SOLUTION

TIME=.00354
SEQV (AVG)
DMX =21.4756
SMN =20.511
SMX =3274.47

ANSYS
R15.0

Academic

MAY 12 2016
16:45:50



1

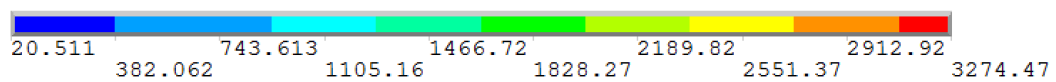
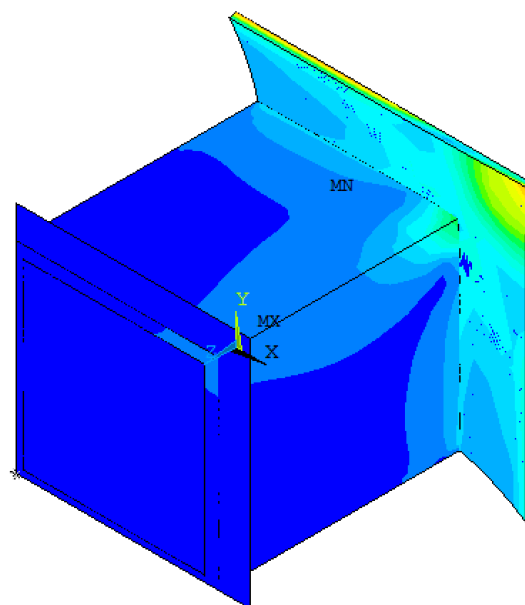
NODAL SOLUTION

TIME=.00354
SEQV (AVG)
DMX =21.4756
SMN =20.511
SMX =3274.47

ANSYS
R15.0

Academic

MAY 12 2016
16:44:41



Fitxer de comandes

```

/BATCH
/input,menust,tmp
,' '
WPSTYLE,,,,,,,,0
/NOPR
KEYW,PR_SET,1
KEYW,PR_STRUC,1
KEYW,PR_THERM,0
KEYW,PR_FLUID,0
KEYW,PR_ELMAG,0
KEYW,MAGNOD,0
KEYW,MAGEDG,0
KEYW,MAGHFE,0
KEYW,MAGELC,0
KEYW,PR_MULT,0
/GO
/PREP7
ET,1,SOLID185
ET,2,MASS21
R,1,,,0.075,,
,,
MPTEMP,,,,,,,,
MPTEMP,1,0
MPDATA,EX,1,,6900
0
MPDATA,PRXY,1,,
MPTEMP,,,,,,,,
MPTEMP,1,0
MPDATA,EX,2,,1800
00
MPDATA,PRXY,2,,
TB,BISO,2,1,2,
TBTEMP,0
TBDATA,,1400,1800
,,,,
K,1,0,0,0,
K,2,0,0,4,
K,3,185,0,4,
K,4,185,0,0,
K,5,185,180,0,
K,6,185,180,4,
K,7,0,180,4,
K,8,0,180,0,
K,8,0,180,0,
V,2,
1,4,
3,7,
8,5,
6
K,9,0,0,154,
K,10,0,125,154,
K,11,0,125,4,
K,12,4,125,4,
K,12,4,125,4,
K,13,4,0,4,
K,14,4,0,154,
K,14,4,125,154,
K,15,4,0,154,
K,15,4,0,154,
V,9,
15,13,
2,10,
14,12,
11
K,16,125,0,154,
K,17,125,0,4,
K,18,125,4,4,
K,19,125,4,154,
K,19,125,4,154,
K,20,4,4,154,
K,21,4,4,4,
K,21,4,4,4,
V,15,
20,21,
13,16,
19,18,
17
K,22,117,4,4,
K,23,117,4,154,
K,23,117,4,154,
K,24,117,125,154,
K,25,117,125,4,
K,26,125,125,4,
K,27,125,125,154,
K,27,125,125,154,
V,19,
23,24,
27,18,
22,25,
26
K,28,117,117,154,
K,29,117,117,4,
GPLOT
K,30,117,4,4,
K,30,4,117,4,
K,31,4,117,154,
K,31,4,117,154,
V,31,
14,12,
30,28,
24,25,
29
FLST,5,4,6,ORDE,2
FITEM,5,2
FITEM,5,-5
CM,_Y,VOLU
VSEL,, , ,P51X
CM,_Y1,VOLU
CMSEL,S,_Y
CMDELE,_Y
CMDELE,_Y1
FLST,5,4,6,ORDE,2
FITEM,5,2
FITEM,5,-5
CM,_Y,VOLU
VSEL,, , ,P51X
CM,_Y1,VOLU
CMSEL,S,_Y
CMDELE,_Y
CMDELE,_Y1
CMDELE,_Y2
CM,_Y,VOLU
VSEL,, , ,
1
CM,_Y1,VOLU
CMSEL,S,_Y
CMSEL,S,_Y1
VATT,,2,
1,1,0
CMSEL,S,_Y
CMDELE,_Y
CMDELE,_Y1
CMDELE,_Y2
CM,_Y,VOLU
VSEL,, , ,
1
CM,_Y1,VOLU
CHKMSH,'VOLU'
CMSEL,S,_Y
VMESH,_Y1
CMDELE,_Y
CMDELE,_Y1
CMDELE,_Y2
GPLOT
K,32,145,145,154,
K,33,145,0,154,
K,34,0,145,154,
K,34,0,145,154,
FLST,2,4,3
FITEM,2,9
FITEM,2,34
FITEM,2,32
FITEM,2,33
A,P51X
GPLOT

```

```

CM,_NODECM,NODE
CM,_ELEMCM,ELEM
CM,_KPCM,KP
CM,_LINECM,LINE
CM,_AREACM,AREA
CM,_VOLUCM,VOLU
MP,MU,1,
MAT,1
R,3
REAL,3
ET,3,170
ET,4,174
KEYOPT,4,9,0
KEYOPT,4,10,2
R,3,
RMORE,
RMORE,,0
RMORE,0
ASEL,S,,,31
CM,_TARGET,AREA
AATT,-1,3,3,-1
TYPE,3
AMESH,ALL
TSHAP,PILO
E,1010
ASEL,S,,,8
ASEL,A,,,14
ASEL,A,,,19
ASEL,A,,,26
CM,_CONTACT,AREA
TYPE,4
NSLA,S,1
ESLN,S,0
NSLE,A,CT2 !
CZMESH patch (fsk
qt-40109 8/2008)
ESURF
*SET,_REALID,3
ALLSEL
ESEL,ALL
ESEL,S,TYPE,,3
ESEL,A,TYPE,,4
ESEL,R,REAL,,3
ASEL,S,REAL,,3
ESEL,ALL
ESEL,S,TYPE,,3
ESEL,A,TYPE,,4
ESEL,R,REAL,,3
ASEL,S,REAL,,3
CMSEL,A,_NODECM
CMDEL,_NODECM
CMSEL,A,_ELEMCM
CMDEL,_ELEMCM
CMSEL,S,_KPCM
CMDEL,_KPCM
CMSEL,S,_LINECM

```

```

CMDEL,_LINECM
CMSEL,S,_AREACM
CMDEL,_AREACM
CMSEL,S,_VOLUCM
CMDEL,_VOLUCM
CMDEL,_TARGET
CMDEL,_CONTACT
GPLOT
CM,_NODECM,NODE
CM,_ELEMCM,ELEM
CM,_KPCM,KP
CM,_LINECM,LINE
CM,_AREACM,AREA
CM,_VOLUCM,VOLU
MP,MU,1,0
MAT,1
R,4
REAL,4
ET,5,170
ET,6,174
KEYOPT,6,9,0
KEYOPT,6,10,2
R,4,
RMORE,
RMORE,,0
RMORE,0
ASEL,S,,,5
CM,_TARGET,AREA
TYPE,5
NSLA,S,1
ESLN,S,0
ESLL,U
ESEL,U,ENAME,,188
,189
NSLE,A,CT2
ESURF
CMSEL,S,_ELEMCM
ASEL,S,,,2
ASEL,A,,,16
ASEL,A,,,24
ASEL,A,,,28
CM,_CONTACT,AREA
TYPE,6
NSLA,S,1
ESLN,S,0
NSLE,A,CT2 !
CZMESH patch (fsk
qt-40109 8/2008)
ESURF
ALLSEL
ESEL,ALL
ESEL,S,TYPE,,5
ESEL,A,TYPE,,6
ESEL,R,REAL,,4
ESEL,ALL
ESEL,S,TYPE,,5

```

```

ESEL,A,TYPE,,6
ESEL,R,REAL,,4
CMSEL,A,_NODECM
CMDEL,_NODECM
CMSEL,A,_ELEMCM
CMDEL,_ELEMCM
CMSEL,S,_KPCM
CMDEL,_KPCM
CMSEL,S,_LINECM
CMDEL,_LINECM
CMSEL,S,_AREACM
CMDEL,_AREACM
CMSEL,S,_VOLUCM
CMDEL,_VOLUCM
CMDEL,_TARGET
CMDEL,_CONTACT
GPLOT
FINISH
/SOL
FINISH
/PREP7
CM,_Y,KP
KSEL,, , ,
9
CM,_Y1,KP
CMSEL,S,_Y
CMSEL,S,_Y1
KATT,1,
1,2,0
CMSEL,S,_Y
CMDELE,_Y
CMDELE,_Y1
CM,_Y,KP
KSEL,, , ,
9
CM,_Y1,KP
CMSEL,S,_Y
CMSEL,S,_Y1
KATT,1,
1,2,0
CMSEL,S,_Y
CMDELE,_Y
CMDELE,_Y1
KMESH,9
FINISH
/SOL
ANTYPE,4
TRNOPT,FULL
LUMPM,0
ANTYPE,4
NLGEOM,1
NSUBST,5000,5000,
5000
OUTRES,ERASE
OUTRES,ALL,5

```

```

RESCONTRL,DEFINE,
ALL,5,1
TIME,0.01
FLST,2,5,5,ORDE,5
FITEM,2,1
FITEM,2,-2
FITEM,2,7
FITEM,2,11
FITEM,2,17
DA,P51X,SYMM
GPLOT
FLST,2,2,4,ORDE,2
FITEM,2,8
FITEM,2,-9
/GO
DL,P51X, ,ALL,
FLST,2,1,1,ORDE,1
FITEM,2,1010
/GO
D,P51X, , , , ,
,UX,UY,ROTX,ROTY,
ROTZ,
FLST,2,1,1,ORDE,1
FITEM,2,1010
IC,P51X,UZ, , -
7000,
OUTRES,ERASE
OUTRES,ALL,5
SOLVE
SOLVE
FINISH
/POST1
FINISH
/POST26
FILE,'main','rst'
, '.'

```

```

/UI,COLL,1
NUMVAR,200
SOLU,191,NCMIT
STORE,MERGE
FILLDATA,191, , , , 1
,1
REALVAR,191,191
NSOL,2,1010,U,Z,
UZ_2,
STORE,MERGE
NSOL,3,1010,V,Z,
VZ_3,
STORE,MERGE
NSOL,4,1010,A,Z,
AZ_4,
STORE,MERGE
FINISH
/SOL
FINISH
/POST1
SET,FIRST
SET, , , , , 101
SET, , , , , 201
SET, , , , , 301
SET, , , , , 401
SET, , , , , 501
SET, , , , , 601
SET, , , , , 701
FINISH
/SOL
ANTYPE,4
TRNOPT,FULL
LUMPM,0
OUTRES,ERASE
OUTRES,ALL,5
LSCLEAR,ALL

```

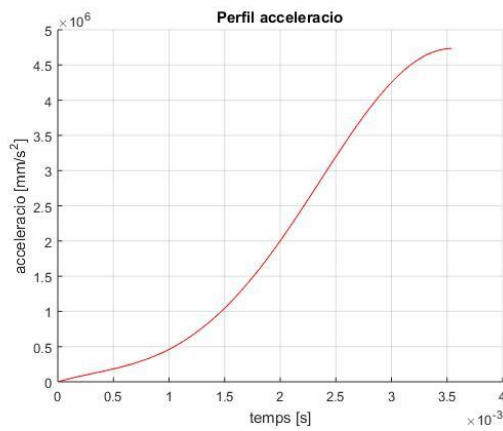
```

NSUBST,5000,5000,
5000
OUTRES,ERASE
OUTRES,ALL,5
RESCONTRL,DEFINE,
ALL,5,1
TIME,0.01
GPLOT
FLST,2,2,5,ORDE,2
FITEM,2,2
FITEM,2,11
DA,P51X,SYMM
FLST,2,3,5,ORDE,3
FITEM,2,1
FITEM,2,7
FITEM,2,17
DA,P51X,SYMM
FLST,2,2,4,ORDE,2
FITEM,2,8
FITEM,2,-9
/GO
DL,P51X, ,ALL,
FLST,2,1,1,ORDE,1
FITEM,2,1010
/GO
D,P51X, , , , ,
,UX,UY,ROTX,ROTY,
ROTZ,
FLST,2,1,1,ORDE,1
FITEM,2,1010
IC,P51X,UZ, , -
7000,
NSUBST,
OUTRES,ERASE
OUTRES,ALL,5
SOLVE

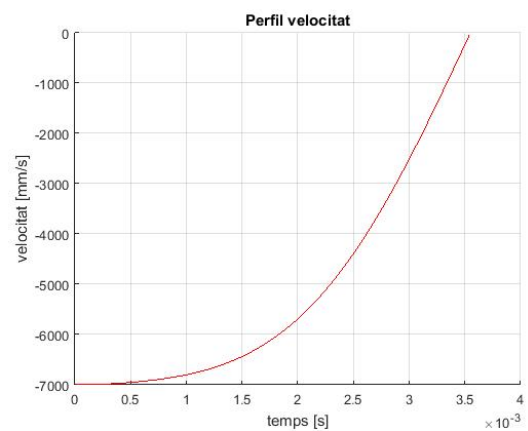
```

Primer model (6mm)

Gràfics representatius del moment final de l'impacte



Gràfica de l'acceleració de la massa

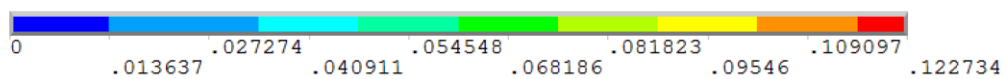
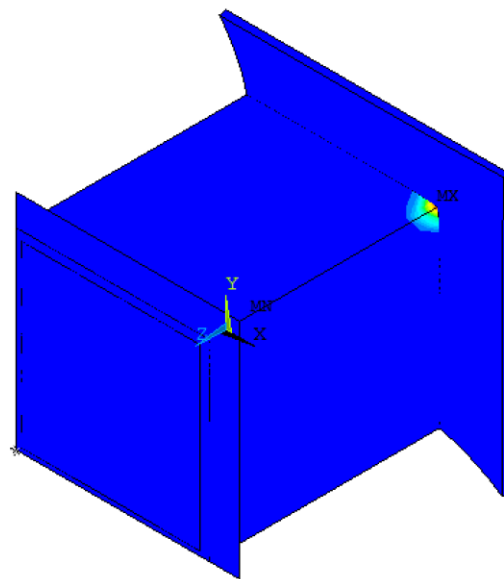


Gràfica de la velocitat de la massa

1
NODAL SOLUTION
TIME=.00354
EPPLEQV (AVG)
DMX =21.4749
SMX =.122734

ANSYS
R15.0
Academic

MAY 12 2016
16:49:45



Deformació plàstica del model

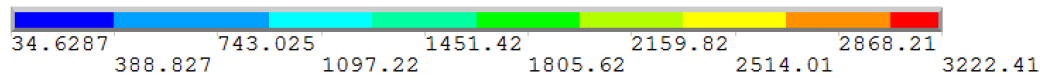
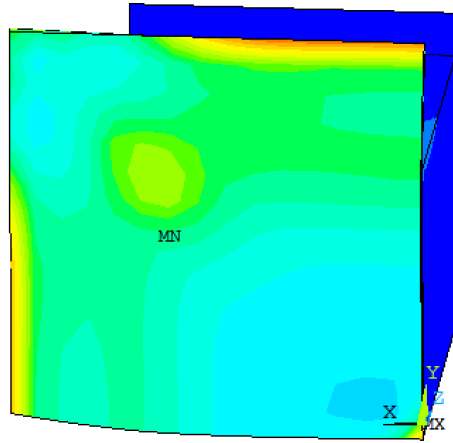
1

NODAL SOLUTION
TIME=.00354
SEQV (AVG)
DMX =21.4749
SMN =34.6287
SMX =3222.41

ANSYS
R15.0

Academic

MAY 12 2016
16:54:56



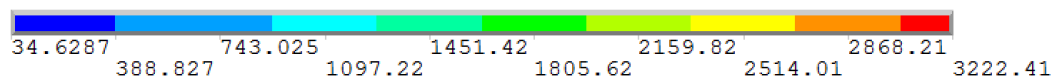
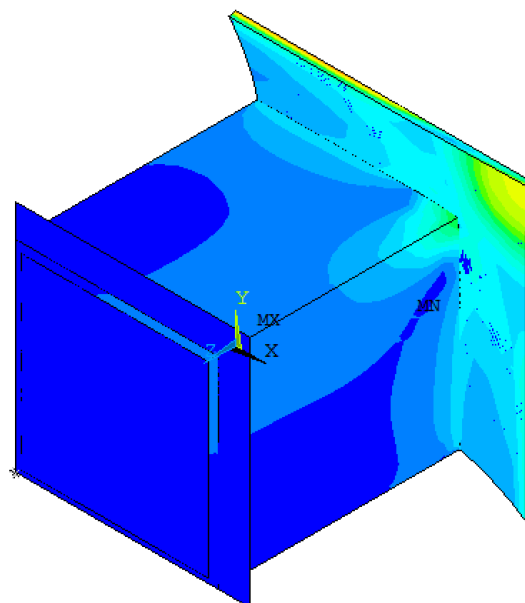
1

NODAL SOLUTION
TIME=.00354
SEQV (AVG)
DMX =21.4749
SMN =34.6287
SMX =3222.41

ANSYS
R15.0

Academic

MAY 12 2016
16:53:31



Fitxer de comandes

/BATCH	4,	8,	30,	33,
/input,menust,tmp	7,	6,	26,	27,
, ''	5		34	
WPSTYLE,,,,,,,,0	K,9,0,0,154,		FLST,2,4,6,ORDE,2	
/NOPR	K,10,0,125,154,		FITEM,2,2	
KEYW,PR_SET,1	K,11,0,125,4,		FITEM,2,-5	
KEYW,PR_STRUC,1	K,12,3,125,4,		VGLUE,P51X	
KEYW,PR_THERM,0	K,12,3,125,154,		GPLOT	
KEYW,PR_FLUID,0	K,13,3,125,4,		K,35,145,145,154,	
KEYW,PR_ELMAG,0	K,13,3,125,4,		K,36,145,0,154,	
KEYW,MAGNOD,0	GPLOT		K,37,0,145,154,	
KEYW,MAGEDG,0	K,14,3,0,4,		K,37,0,145,154,	
KEYW,MAGHFE,0	K,15,3,0,154,		FLST,2,4,3	
KEYW,MAGELC,0	K,15,3,0,154,		FITEM,2,9	
KEYW,PR_MULTI,0	V,15,		FITEM,2,37	
/GO	9,10,		FITEM,2,35	
/PREP7	12,14,		FITEM,2,36	
ET,1,SOLID185	2,11,		A,P51X	
ET,2,MASS21	13		FLST,5,4,6,ORDE,2	
R,1,,0.075,,	K,16,3,3,154,		FITEM,5,5	
, ,	K,17,3,3,4,		FITEM,5,-8	
MPTEMP,,,,,,,,	K,17,3,3,4,		CM,_Y,VOLU	
MPTEMP,1,0	K,17,125,0,4,		VSEL,, , ,P51X	
MPDATA,EX,1,,6900	K,18,3,3,4,		CM,_Y1,VOLU	
0	K,19,125,0,154,		CMSEL,S,_Y	
MPDATA,PRXY,1,,	K,20,125,3,154,		CMSEL,S,_Y1	
MPTEMP,,,,,,,,	K,21,125,3,4,		VATT,2,	
MPTEMP,1,0	K,21,125,3,4,		1,1,0	
MPDATA,EX,2,,1800	V,15,		CMSEL,S,_Y	
00	16,18,		CMDELE,_Y	
MPDATA,PRXY,2,,	14,19,		CMDELE,_Y1	
TB,BISO,2,1,2,	20,21,		FLST,5,4,6,ORDE,2	
TBTEMP,0	17		FITEM,5,5	
TBDATA,,1400,1800	K,22,119,3,4,		FITEM,5,-8	
, , , ,	K,23,119,3,154,		CM,_Y,VOLU	
TBDE,BISO,2, , ,	K,23,119,3,154,		VSEL,, , ,P51X	
TB,BISO,2,1,2,	K,24,125,125,154,		CM,_Y1,VOLU	
TBTEMP,0	K,25,125,125,4,		CHKMSH,'VOLU'	
TBDATA,,1400,1800	K,26,119,125,154,		CMSEL,S,_Y	
, , , ,	K,27,119,125,4,		VSWEEP,_Y1	
GPLOT	K,27,119,125,4,		CMDELE,_Y	
K,1,0,0,0,	V,20,		CMDELE,_Y1	
K,2,0,0,4,	23,26,		CMDELE,_Y2	
K,3,185,0,4,	24,21,		CM,_Y,VOLU	
K,3,185,0,0,	22,27,		VSEL,, , ,	
K,4,185,0,4,	25		1	
K,4,185,0,4,	K,30,3,119,4,		CM,_Y1,VOLU	
K,5,185,180,4,	K,31,3,119,154,		CMSEL,S,_Y	
K,6,185,180,0,	K,31,3,119,154,		CMSEL,S,_Y1	
K,7,0,180,0,	K,33,119,119,154,		VATT,1,	
K,8,0,180,4,	K,34,119,119,4,		1,1,0	
K,8,0,180,4,	K,34,119,119,4,		CMSEL,S,_Y	
V,2,	V,31,		CMDELE,_Y	
1,3,	12,13,		CMDELE,_Y1	

```

CM,_Y,VOLU
VSEL, , , ,
1
CM,_Y1,VOLU
CMSEL,S,_Y
CMSEL,S,_Y1
VATT, , , 1,
1, 1, , 0
CMSEL,S,_Y
CMDELE,_Y
CMDELE,_Y1
MSHAPE,0,3D
MSHKEY,1
CM,_Y,VOLU
VSEL, , , ,
1
CM,_Y1,VOLU
CHKMSH,'VOLU'
CMSEL,S,_Y
VMESH,_Y1
CMDELE,_Y
CMDELE,_Y1
CMDELE,_Y2
CM,_NODECM,NODE
CM,_ELEMCM,ELEM
CM,_KPCM,KP
CM,_LINECM,LINE
CM,_AREACM,AREA
CM,_VOLUCM,VOLU
MP,MU,1,
MAT,1
R,3
REAL,3
ET,3,170
ET,4,174
KEYOPT,4,9,0
KEYOPT,4,10,2
R,3,
RMORE,
RMORE,,0
RMORE,0
ASEL,S,,,7
CM,_TARGET,AREA
AATT,-1,3,3,-1
TYPE,3
AMESH,ALL
TSHAP,PILO
E,2349
ASEL,S,,,26
ASEL,A,,,32
ASEL,A,,,35
ASEL,A,,,38
CM,_CONTACT,AREA
TYPE,4
NSLA,S,1
ESLN,S,0

```

```

NSLE,A,CT2 !
CZMESH patch (fsk
qt-40109 8/2008)
ESURF
*SET,_REALID,3
ALLSEL
ESEL,ALL
ESEL,S,TYPE,,3
ESEL,A,TYPE,,4
ESEL,R,REAL,,3
ASEL,S,REAL,,3
ESEL,ALL
ESEL,S,TYPE,,3
ESEL,A,TYPE,,4
ESEL,R,REAL,,3
ASEL,S,REAL,,3
CMSEL,A,_NODECM
CMDEL,_NODECM
CMSEL,A,_ELEMCM
CMDEL,_ELEMCM
CMSEL,S,_KPCM
CMDEL,_KPCM
CMSEL,S,_LINECM
CMDEL,_LINECM
CMSEL,S,_AREACM
CMDEL,_AREACM
CMSEL,S,_VOLUCM
CMDEL,_VOLUCM
CMDEL,_TARGET
CMDEL,_CONTACT
CM,_NODECM,NODE
CM,_ELEMCM,ELEM
CM,_KPCM,KP
CM,_LINECM,LINE
CM,_AREACM,AREA
CM,_VOLUCM,VOLU
MP,MU,1,0
MAT,1
R,4
REAL,4
ET,5,170
ET,6,174
KEYOPT,6,9,0
KEYOPT,6,10,2
R,4,
RMORE,
RMORE,,0
RMORE,0
ASEL,S,,,5
CM,_TARGET,AREA
TYPE,5
NSLA,S,1
ESLN,S,0
ESLL,U
ESEL,U,ENAME,,188
,189

```

```

NSLE,A,CT2
ESURF
CMSEL,S,_ELEMCM
ASEL,S,,,28
ASEL,A,,,33
ASEL,A,,,36
ASEL,A,,,39
CM,_CONTACT,AREA
TYPE,6
NSLA,S,1
ESLN,S,0
NSLE,A,CT2 !
CZMESH patch (fsk
qt-40109 8/2008)
ESURF
ALLSEL
ESEL,ALL
ESEL,S,TYPE,,5
ESEL,A,TYPE,,6
ESEL,R,REAL,,4
ESEL,ALL
ESEL,S,TYPE,,5
ESEL,A,TYPE,,6
ESEL,R,REAL,,4
CMSEL,A,_NODECM
CMDEL,_NODECM
CMSEL,A,_ELEMCM
CMDEL,_ELEMCM
CMSEL,S,_KPCM
CMDEL,_KPCM
CMSEL,S,_LINECM
CMDEL,_LINECM
CMSEL,S,_AREACM
CMDEL,_AREACM
CMSEL,S,_VOLUCM
CMDEL,_VOLUCM
CMDEL,_TARGET
CMDEL,_CONTACT
KMESH, , , 9
CM,_Y,KP
KSEL, , , ,
9
CM,_Y1,KP
CMSEL,S,_Y
CMSEL,S,_Y1
KATT, , , 1,
1, 2, , 0
CMSEL,S,_Y
CMDELE,_Y
CMDELE,_Y1
KCLEAR, , , 9
CM,_Y,KP
KSEL, , , ,
9
CM,_Y1,KP
CMSEL,S,_Y

```

```

CMSEL,S,_Y1
KATT,      1,
1,      2,      0
CMSEL,S,_Y
CMDELE,_Y
CMDELE,_Y1
KMESH,      9
FINISH
/SOL
ANTYPE,4
TRNOPT,FULL
LUMPM,0
ANTYPE,4
NLGEOM,1
NSUBST,5000,5000,
5000

```

```

OUTRES,ERASE
OUTRES,ALL,5
RESCONTRL,DEFINE,
ALL,5,1
TIME,0.01
FLST,2,2,5,ORDE,2
FITEM,2,2
FITEM,2,9
DA,P51X,SYMM
FLST,2,3,5,ORDE,3
FITEM,2,1
FITEM,2,8
FITEM,2,17
DA,P51X,SYMM
FLST,2,2,4,ORDE,2
FITEM,2,8

```

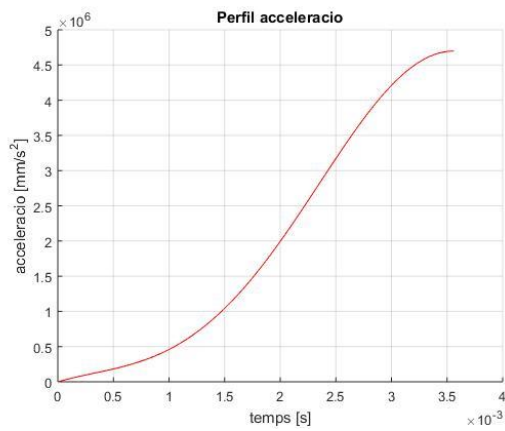
```

FITEM,2,-9
/GO
DL,P51X, ,ALL,
FLST,2,1,1,ORDE,1
FITEM,2,2349
/GO
D,P51X, , , , ,
,UX,UY,ROTX,ROTY,
ROTZ,
FLST,2,1,1,ORDE,1
FITEM,2,2349
IC,P51X,UZ, , -
7000,
SOLVE

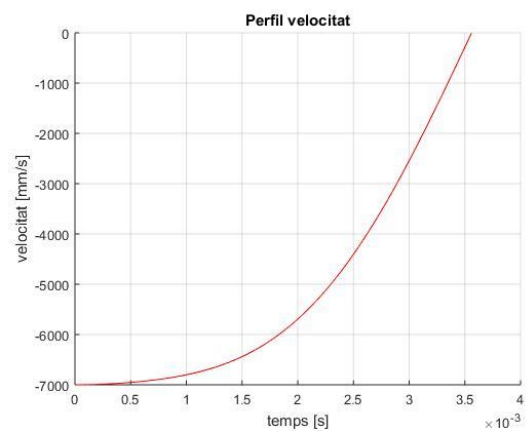
```

Primer model (4mm)

Gràfics representatius del moment final de l'impacte



Gràfica de l'acceleració de la massa

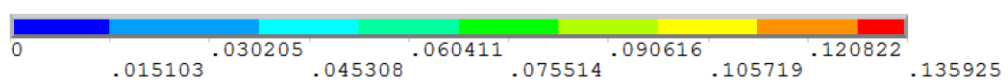
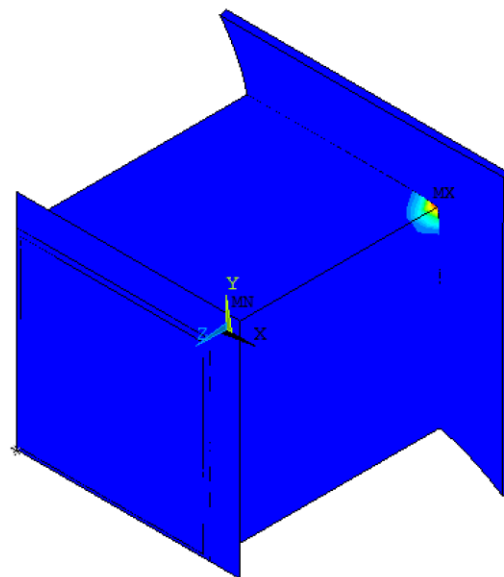


Gràfica de la velocitat de la massa

1
NODAL SOLUTION
TIME=.00356
EPPLEQV (AVG)
DMX =21.4317
SMX =.135925

ANSYS
R15.0
Academic

MAY 12 2016
17:13:10

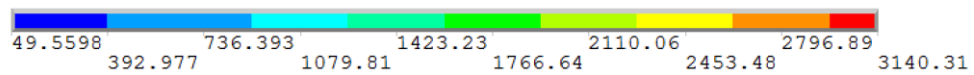
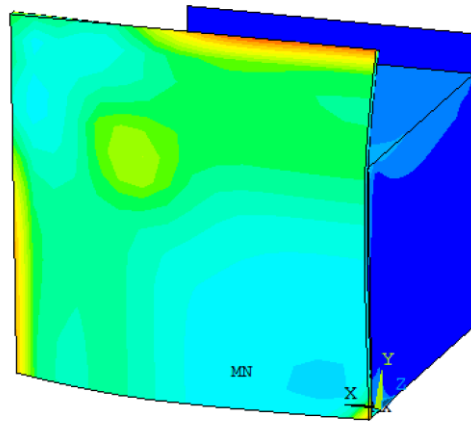


Deformació plàstica del model

1
NODAL SOLUTION
TIME=.00356
SEQV (AVG)
DMX =21.4317
SMN =49.5598
SMX =3140.31

ANSYS
R15.0
Academic

MAY 12 2016
17:12:23

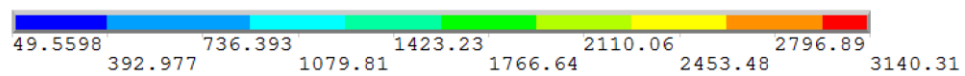
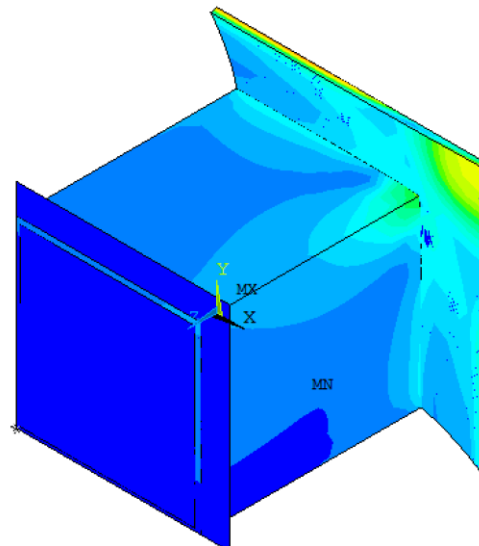


Tensió equivalent de Von Mises

1
NODAL SOLUTION
TIME=.00356
SEQV (AVG)
DMX =21.4317
SMN =49.5598
SMX =3140.31

ANSYS
R15.0
Academic

MAY 12 2016
17:11:26



Tensió equivalent de Von Mises

Fitxer de comandes

/BATCH	K,11,0,125,4,	30,	29,
/input,menust,tmp	K,12,2,125,4,	14,	12,
, ''	K,13,2,0,4,	28	
WPSTYLE,,,,,,,,0	K,13,2,0,154,	FLST,2,4,6,ORDE,2	
/NOPR	K,14,2,125,154,	FITEM,2,2	
KEYW,PR_SET,1	K,14,2,125,154,	FITEM,2,-5	
KEYW,PR_STRUC,1	K,15,2,0,4,	VGLUE,P51X	
KEYW,PR_THERM,0	K,15,2,0,4,	K,40,145,145,154,	
KEYW,PR_FLUID,0	V,	13,	K,41,0,145,154,
KEYW,PR_ELMAG,0	9,	2,	K,42,145,0,154,
KEYW,MAGNOD,0	15,	14,	K,42,145,0,154,
KEYW,MAGEDG,0	10,	11,	FLST,5,4,6,ORDE,2
KEYW,MAGHFE,0	12		FITEM,5,5
KEYW,MAGELC,0	K,16,2,2,4,	FITEM,5,-8	
KEYW,PR_MULTI,0	K,16,2,2,154,	CM,_Y,VOLU	
/GO	K,17,125,0,4,	VSEL, , , ,P51X	
/PREP7	K,18,125,0,154,	CM,_Y1,VOLU	
ET,1,SOLID185	K,19,125,2,154,	CMSEL,S,_Y	
ET,2,MASS21	K,20,125,2,4,	CMSEL,S,_Y1	
R,1, , ,0.075, ,	K,20,125,2,4,	VATT, , ,2,	
, ,	GCPLOT	1, 1, ,0	
MPTEMP,,,,,,,,	K,21,2,2,4,	CMSEL,S,_Y	
MPTEMP,1,0	K,21,2,2,4,	CMDELE,_Y	
MPDATA,EX,1,,6900	V,	13,	CMDELE,_Y1
0	16,	21,	MSHAPE,0,3D
MPDATA,PRXY,1,,	15,	18,	MSHKEY,1
MPTEMP,,,,,,,,	19,	20,	FLST,5,4,6,ORDE,2
MPTEMP,1,0	17		FITEM,5,5
MPDATA,EX,2,,1800	K,22,121,2,4,	FITEM,5,-8	
00	K,22,121,2,154,	CM,_Y,VOLU	
MPDATA,PRXY,2,,	K,22,121,2,154,	VSEL, , , ,P51X	
TB,BISO,2,1,2,	GCPLOT	CM,_Y1,VOLU	
TBTEMP,0	K,23,121,2,4,	CHKMSH,'VOLU'	
TBDATA,,1400,1800	K,23,121,2,4,	CMSEL,S,_Y	
, , , ,	K,24,121,125,4,	VMESH,_Y1	
K,1,0,0,0,	K,25,121,125,154,	CMDELE,_Y	
K,2,0,0,4,	K,26,125,125,154,	CMDELE,_Y1	
K,3,185,180,0,	K,27,125,125,4,	CMDELE,_Y2	
K,4,185,180,4,	K,27,125,125,4,	FLST,5,4,6,ORDE,2	
K,5,185,0,4,	V,	19,	FITEM,5,5
K,6,185,0,4,	22,	23,	FITEM,5,-8
K,6,185,0,0,	20,	26,	CM,_Y,VOLU
K,7,0,180,0,	25,	24,	VSEL, , , ,P51X
K,7,0,180,4,	27		CM,_Y1,VOLU
K,7,0,180,4,	K,28,2,121,4,	CHKMSH,'VOLU'	
K,8,0,180,0,	K,29,2,121,154,	CMSEL,S,_Y	
K,8,0,180,0,	K,30,121,121,154,	VSWEEP,_Y1	
V,	K,30,121,121,4,	CMDELE,_Y	
1,	K,30,121,121,4,	CMDELE,_Y1	
5,	GCPLOT	CMDELE,_Y2	
8,	K,31,121,121,154,	CM,_Y,VOLU	
4	K,31,121,121,154,	VSEL, , , ,	
K,9,0,0,154,	V,	31,	1
K,10,0,125,154,	25,	24,	CM,_Y1,VOLU

```

CMSEL,S,_Y
CMSEL,S,_Y1
VATT,1,1,0
CMSEL,S,_Y
CMDELE,_Y
CMDELE,_Y1
CM,_Y,VOLU
VSEL,, , ,
1
CM,_Y1,VOLU
CHKMSH,'VOLU'
CMSEL,S,_Y
VMESH,_Y1
CMDELE,_Y
CMDELE,_Y1
CMDELE,_Y2
FLST,2,4,3
FITEM,2,9
FITEM,2,41
FITEM,2,40
FITEM,2,42
A,P51X
GPLOT
CM,_NODECM,NODE
CM,_ELEMCM,ELEM
CM,_KPCM,KP
CM,_LINECM,LINE
CM,_AREACM,AREA
CM,_VOLUCM,VOLU
MP,MU,1,
MAT,1
R,3
REAL,3
ET,3,170
ET,4,174
KEYOPT,4,9,0
KEYOPT,4,10,2
R,3,
RMORE,
RMORE,,0
RMORE,0
ASEL,S,,,8
CM,_TARGET,AREA
AATT,-1,3,3,-1
TYPE,3
AMESH,ALL
TSHAP,PILO
E,2384
ASEL,S,,,26
ASEL,A,,,32
ASEL,A,,,35
ASEL,A,,,38
CM,_CONTACT,AREA
TYPE,4
NSLA,S,1

```

```

ESLN,S,0
NSLE,A,CT2 !
CZMESH patch (fsk
qt-40109 8/2008)
ESURF
*SET,REALID,3
ALLSEL
ESEL,ALL
ESEL,S,TYPE,,3
ESEL,A,TYPE,,4
ESEL,R,REAL,,3
ASEL,S,REAL,,3
ESEL,ALL
ESEL,S,TYPE,,3
ESEL,A,TYPE,,4
ESEL,R,REAL,,3
ASEL,S,REAL,,3
CMSEL,A,_NODECM
CMDEL,_NODECM
CMSEL,A,_ELEMCM
CMDEL,_ELEMCM
CMSEL,S,_KPCM
CMDEL,_KPCM
CMSEL,S,_LINECM
CMDEL,_LINECM
CMSEL,S,_AREACM
CMDEL,_AREACM
CMSEL,S,_VOLUCM
CMDEL,_VOLUCM
CMDEL,_TARGET
CMDEL,_CONTACT
*CREATE,cwzplot,m
ac
/COM,
/COM,PLOT CONTACT
PAIR(S)
~eui,':::apdl::nop
rint 1'
~eui,':::apdl::noo
utput 1'
!*
CM,_CWZ_EL,ELEM
CM,_CWZ_ND,NODE
CM,_CWZ_KP,KP
CM,_CWZ_LN,LINE
CM,_CWZ_AR,AREA
CM,_CWZ_VL,VOLU
ESEL,NONE
ESEL,A,REAL,,3
ESEL,R,ENAME,,169
,177
NSLE
KSLN,S
LSLK,S,1
ASLL,S,1
/PNUM,TYPE,1

```

```

/NUM,1
/PSYMB,ESYS,0
EPLOT
CMSEL,S,_CWZ_EL
CMDEL,_CWZ_EL
CMSEL,S,_CWZ_ND
CMDEL,_CWZ_ND
CMSEL,S,_CWZ_KP
CMDEL,_CWZ_KP
CMSEL,S,_CWZ_LN
CMDEL,_CWZ_LN
CMSEL,S,_CWZ_AR
CMDEL,_CWZ_AR
CMSEL,S,_CWZ_VL
CMDEL,_CWZ_VL
!*
/PSYMB,ESYS,0
/NUM,0
/PNUM,TYPE,0
/PNUM,REAL,0
/mrep,cwzplot
~eui,':::apdl::noo
utput 0'
~eui,':::apdl::nop
rint 0'
*END
cwzplot
CM,_NODECM,NODE
CM,_ELEMCM,ELEM
CM,_KPCM,KP
CM,_LINECM,LINE
CM,_AREACM,AREA
CM,_VOLUCM,VOLU
MP,MU,1,0
MAT,1
R,4
REAL,4
ET,5,170
ET,6,174
KEYOPT,6,9,0
KEYOPT,6,10,2
R,4,
RMORE,
RMORE,,0
RMORE,0
ASEL,S,,,5
CM,_TARGET,AREA
TYPE,5
NSLA,S,1
ESLN,S,0
ESLL,U
ESEL,U,ENAME,,188
,189
NSLE,A,CT2
ESURF
CMSEL,S,_ELEMCM

```



```

ASEL,S,,,28
ASEL,A,,,33
ASEL,A,,,36
ASEL,A,,,39
CM,_CONTACT,AREA
TYPE,6
NSLA,S,1
ESLN,S,0
NSLE,A,CT2 !
CZMESH patch (fsk
qt-40109 8/2008)
ESURF
ALLSEL
ESEL,ALL
ESEL,S,TYPE,,5
ESEL,A,TYPE,,6
ESEL,R,REAL,,4
ESEL,ALL
ESEL,S,TYPE,,5
ESEL,A,TYPE,,6
ESEL,R,REAL,,4
CMSEL,A,_NODECM
CMDEL,_NODECM
CMSEL,A,_ELEMCM
CMDEL,_ELEMCM
CMSEL,S,_KPCM
CMDEL,_KPCM
CMSEL,S,_LINECM
CMDEL,_LINECM
CMSEL,S,_AREACM
CMDEL,_AREACM
CMSEL,S,_VOLUCM
CMDEL,_VOLUCM
CMDEL,_TARGET
CMDEL,_CONTACT
GPLOT
CM,_Y,KP
KSEL,, , , ,
9
CM,_Y1,KP
CMSEL,S,_Y
CMSEL,S,_Y1
KATT,1,
1,2,0
CMSEL,S,_Y
CMDELE,_Y
CMDELE,_Y1
KMESH,9
FINISH
/SOL

```

```

ANTYPE,4
TRNOPT,FULL
LUMPM,0
ANTYPE,4
NLGEOM,1
NSUBST,5000,5000,
5000
OUTRES,ERASE
OUTRES,ALL,5
RESCONTRL,DEFINE,
ALL,5,1
TIME,0.01
FLST,2,2,5,ORDE,2
FITEM,2,2
FITEM,2,9
DA,P51X,SYMM
FLST,2,3,5,ORDE,3
FITEM,2,1
FITEM,2,17
FITEM,2,32
DA,P51X,SYMM
GPLOT
FLST,2,2,4,ORDE,2
FITEM,2,8
FITEM,2,-9
/GO
DL,P51X, ,ALL,
FLST,2,1,3,ORDE,1
FITEM,2,9
/GO
DK,P51X, , ,
,0,UX,UY,ROTX,ROT
Y,ROTZ, ,
GPLOT
FLST,2,1,1,ORDE,1
FITEM,2,2384
IC,P51X,UZ,-7000,
,
SOLVE
GPLOT
ANTYPE,4
TRNOPT,FULL
LUMPM,0
GPLOT
LSCLEAR,ALL
GPLOT
FINISH
/PREP7
R,1,0,0,0.075,0,0
,0,
FINISH

```

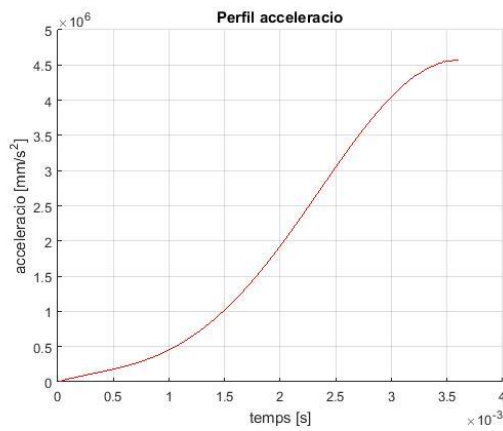
```

/SOL
ANTYPE,4
TRNOPT,FULL
LUMPM,1
NSUBST,5000,5000,
5000
OUTRES,ERASE
OUTRES,ALL,5
RESCONTRL,DEFINE,
ALL,5,1
TIME,0.01
FLST,2,2,5,ORDE,2
FITEM,2,2
FITEM,2,9
DA,P51X,SYMM
FLST,2,3,5,ORDE,3
FITEM,2,1
FITEM,2,17
FITEM,2,32
DA,P51X,SYMM
GPLOT
FLST,2,2,4,ORDE,2
FITEM,2,8
FITEM,2,-9
/GO
DL,P51X, ,ALL,
FLST,2,1,3,ORDE,1
FITEM,2,9
/GO
DK,P51X, , ,
,0,UX,UY,ROTX,ROT
Y,ROTZ, ,
FLST,2,1,3,ORDE,1
FITEM,2,9
DKDELE,P51X,ALL
GPLOT
FLST,2,1,1,ORDE,1
FITEM,2,2384
/GO
D,P51X, , , , ,
,UX,UY,ROTX,ROTY,
ROTZ,
FLST,2,1,1,ORDE,1
FITEM,2,2384
IC,P51X,UZ, , -
7000,
OUTRES,ERASE
OUTRES,ALL,5
SOLVE

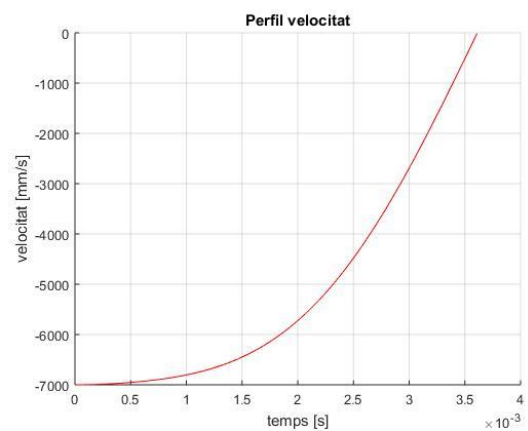
```

Primer model (2mm)

Gràfics representatius del moment final de l'impacte



Gràfica de l'acceleració de la massa

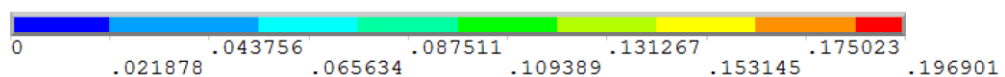
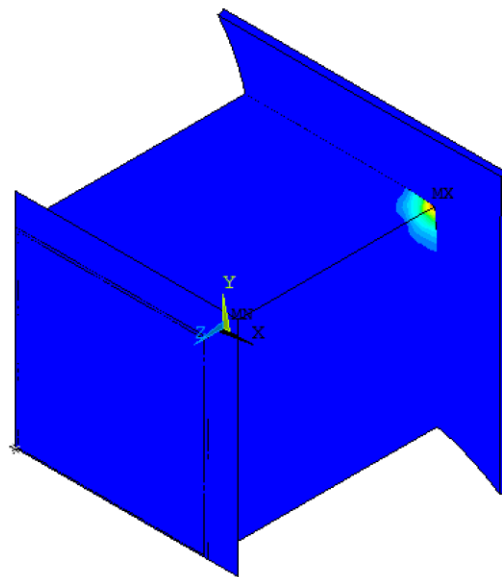


Gràfica de la velocitat de la massa

1
NODAL SOLUTION
TIME=.00361
EPPLEQV (AVG)
DMX =21.451
SMX =.196901

ANSYS
R15.0
Academic

MAY 12 2016
17:18:35

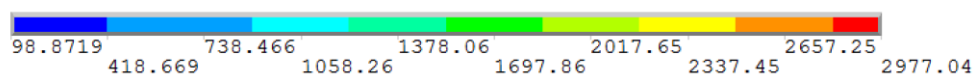
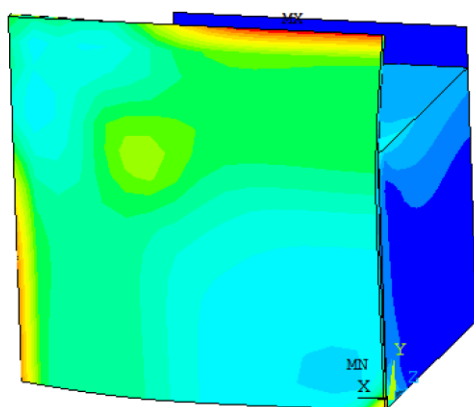


Deformació plàstica del model

1
NODAL SOLUTION
TIME=.00361
SEQV (AVG)
DMX =21.451
SMN =98.8719
SMX =2977.04

ANSYS
R15.0
Academic

MAY 12 2016
17:17:43

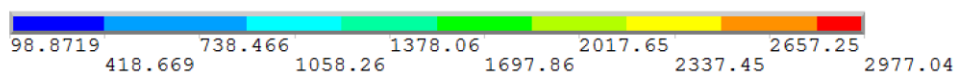
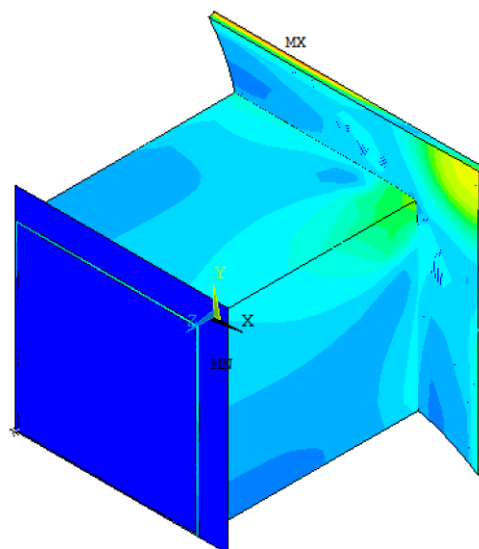


Tensió equivalent de Von Mises

1
NODAL SOLUTION
TIME=.00361
SEQV (AVG)
DMX =21.451
SMN =98.8719
SMX =2977.04

ANSYS
R15.0
Academic

MAY 12 2016
17:16:46



Tensió equivalent de Von Mises

Fitxer de comandes

/BATCH	K,13,0,125,154,	FITEM,2,33
/input,menust,tmp	K,14,1,125,154,	FITEM,2,32
, ''	K,15,1,125,4,	FITEM,2,34
WPSTYLE,,,,,,,,0	K,15,1,125,4,	A,P51X
/NOPR	V, 9,	FLST,5,4,6,ORDE,2
KEYW,PR_SET,1	10, 11,	FITEM,5,5
KEYW,PR_STRUC,1	2, 13,	FITEM,5,-8
KEYW,PR_THERM,0	14, 15,	CM,_Y,VOLU
KEYW,PR_FLUID,0	12	VSEL, , , ,P51X
KEYW,PR_ELMAG,0	K,16,1,1,4,	CM,_Y1,VOLU
KEYW,MAGNOD,0	K,17,1,1,154,	CMSEL,S,_Y
KEYW,MAGEDG,0	K,18,125,0,154,	CMSEL,S,_Y1
KEYW,MAGHFE,0	K,19,125,0,4,	VATT, 2,
KEYW,MAGELC,0	K,20,125,1,4,	1, 1, 0
KEYW,PR_MULT,0	K,21,125,1,154,	CMSEL,S,_Y
/GO	K,21,125,1,154,	CMDELE,_Y
/PREP7	V, 10,	CMDELE,_Y1
ET,1,SOLID185	17, 16,	MSHAPE,0,3D
ET,2,MASS21	11, 18,	MSHKEY,1
R,1, , ,0.075, ,	21, 20,	FLST,5,4,6,ORDE,2
, ,	19	FITEM,5,5
MPTEMP,,,,,,,,	K,22,123,1,154,	FITEM,5,-8
MPTEMP,1,0	K,23,123,1,4,	CM,_Y,VOLU
MPDATA,EX,1,,6900	K,24,123,125,4,	VSEL, , , ,P51X
0	K,25,125,125,4,	CM,_Y1,VOLU
MPDATA,PRXY,1,,	K,26,125,125,154,	CHKMSH,'VOLU'
MPTEMP,,,,,,,,	K,27,123,125,154,	CMSEL,S,_Y
MPTEMP,1,0	K,27,123,125,154,	VMESH,_Y1
MPDATA,EX,2,,1800	GPlot	CMDELE,_Y
00	V, 21,	CMDELE,_Y1
MPDATA,PRXY,2,,0	22, 27,	CMDELE,_Y2
TB,BISO,2,1,2,	26, 20,	FLST,5,4,6,ORDE,2
TBTEMP,0	23, 24,	FITEM,5,5
TBDATA,,1400,1800	25	FITEM,5,-8
, , , ,	K,28,123,123,154,	CM,_Y,VOLU
K,1,0,0,0,	K,29,1,123,154,	VSEL, , , ,P51X
K,2,0,0,4,	K,30,1,123,4,	CM,_Y1,VOLU
K,3,185,0,4,	K,31,123,123,4,	CHKMSH,'VOLU'
K,4,185,0,0,	K,31,123,123,4,	CMSEL,S,_Y
K,5,185,180,0,	V, 29,	VSWEEP,_Y1
K,6,185,180,4,	14, 15,	CMDELE,_Y
K,7,0,180,4,	30, 28,	CMDELE,_Y1
K,8,0,180,0,	27, 24,	CMDELE,_Y2
K,8,0,180,0,	31	FLST,2,5,6,ORDE,3
V, 2,	FLST,2,4,6,ORDE,2	FITEM,2,1
1, 4,	FITEM,2,2	FITEM,2,5
3, 7,	FITEM,2,-5	FITEM,2,-8
8, 5,	VGLUE,P51X	VCLEAR,P51X
6	K,32,145,145,154,	MSHAPE,1,3D
K,9,0,0,154,	K,33,0,145,154,	MSHKEY,0
K,10,1,0,154,	K,34,145,0,154,	EXTO,VSWE,AUTO,OF
K,11,1,0,4,	K,34,145,0,154,	F
K,11,1,0,4,	FLST,2,4,3	EXTO,VSWE,AUTO,ON
K,12,0,125,4,	FITEM,2,9	FLST,5,4,6,ORDE,2

```

FITEM,5,5
FITEM,5,-8
CM,_Y,VOLU
VSEL,, , ,P51X
CM,_Y1,VOLU
CHKMSH,'VOLU'
CMSEL,S,_Y
VMESH,_Y1
CMDELE,_Y
CMDELE,_Y1
CMDELE,_Y2
FLST,2,5,6,ORDE,3
FITEM,2,1
FITEM,2,5
FITEM,2,-8
VCLEAR,P51X
WPSTYLE,,,,,,,,0
GPLOT
/PREP7
FLST,5,4,6,ORDE,2
FITEM,5,5
FITEM,5,-8
CM,_Y,VOLU
VSEL,, , ,P51X
CM,_Y1,VOLU
CMSEL,S,_Y
CMSEL,S,_Y1
VATT,2,
1,1,0
CMSEL,S,_Y
CMDELE,_Y
CMDELE,_Y1
FLST,5,4,6,ORDE,2
FITEM,5,5
FITEM,5,-8
CM,_Y,VOLU
VSEL,, , ,P51X
CM,_Y1,VOLU
CHKMSH,'VOLU'
CMSEL,S,_Y
VSWEEP,_Y1
CMDELE,_Y
CMDELE,_Y1
CMDELE,_Y2
GPLOT
CM,_Y,VOLU
VSEL,, , ,
1
CM,_Y1,VOLU
CMSEL,S,_Y
CMSEL,S,_Y1
VATT,1,
1,1,0
CMSEL,S,_Y
CMDELE,_Y
CMDELE,_Y1

```

```

MSHAPE,0,3D
MSHKEY,1
CM,_Y,VOLU
VSEL,, , ,
1
CM,_Y1,VOLU
CHKMSH,'VOLU'
CMSEL,S,_Y
VMESH,_Y1
CMDELE,_Y
CMDELE,_Y1
CMDELE,_Y2
FLST,2,4,6,ORDE,2
FITEM,2,5
FITEM,2,-8
VGLUE,P51X
GPLOT
CM,_NODECM,NODE
CM,_ELEMCM,ELEM
CM,_KPCM,KP
CM,_LINECM,LINE
CM,_AREACM,AREA
CM,_VOLUCM,VOLU
MP,MU,1,
MAT,1
R,3
REAL,3
ET,3,170
ET,4,174
KEYOPT,4,9,0
KEYOPT,4,10,2
R,3,
RMORE,
RMORE,,0
RMORE,0
ASEL,S,,,8
CM,_TARGET,AREA
AATT,-1,3,3,-1
TYPE,3
AMESH,ALL
TSHAP,PILO
E,1951
ASEL,S,,,26
ASEL,A,,,32
ASEL,A,,,35
ASEL,A,,,38
CM,_CONTACT,AREA
TYPE,4
NSLA,S,1
ESLN,S,0
NSLE,A,CT2 !
CZMESH patch (fsk
qt-40109 8/2008)
ESURF
*SET,_REALID,3
ALLSEL

```

```

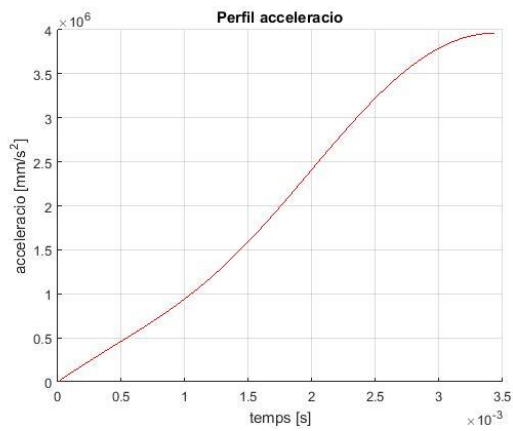
ESEL,ALL
ESEL,S,TYPE,,3
ESEL,A,TYPE,,4
ESEL,R,REAL,,3
ASEL,S,REAL,,3
ESEL,ALL
ESEL,S,TYPE,,3
ESEL,A,TYPE,,4
ESEL,R,REAL,,3
ASEL,S,REAL,,3
CMSEL,A,_NODECM
CMDEL,_NODECM
CMSEL,A,_ELEMCM
CMDEL,_ELEMCM
CMSEL,S,_KPCM
CMDEL,_KPCM
CMSEL,S,_LINECM
CMDEL,_LINECM
CMSEL,S,_AREACM
CMDEL,_AREACM
CMSEL,S,_VOLUCM
CMDEL,_VOLUCM
CMDEL,_TARGET
CMDEL,_CONTACT
CM,_NODECM,NODE
CM,_ELEMCM,ELEM
CM,_KPCM,KP
CM,_LINECM,LINE
CM,_AREACM,AREA
CM,_VOLUCM,VOLU
MP,MU,1,0
MAT,1
R,4
REAL,4
ET,5,170
ET,6,174
KEYOPT,6,9,0
KEYOPT,6,10,2
R,4,
RMORE,
RMORE,,0
RMORE,0
ASEL,S,,,5
CM,_TARGET,AREA
TYPE,5
NSLA,S,1
ESLN,S,0
ESLL,U
ESEL,U,ENAME,,188
,189
NSLE,A,CT2
ESURF
CMSEL,S,_ELEMCM
ASEL,S,,,28
ASEL,A,,,33
ASEL,A,,,36

```

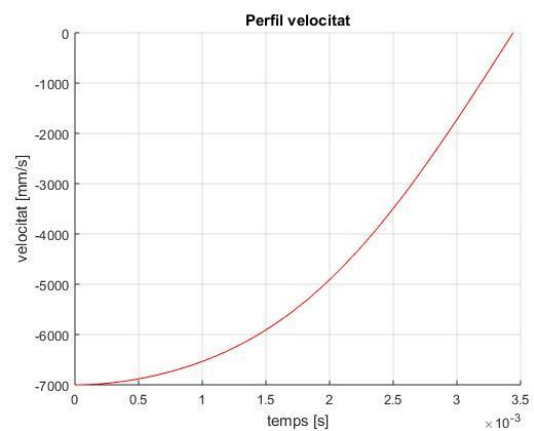
ASEL,A,,,39	CMSEL,S,_VOLUCM	RESCONTRL,DEFINE,
CM,_CONTACT,AREA	CMDEL,_VOLUCM	ALL,5,1
TYPE,6	CMDEL,_TARGET	TIME,0.01
NSLA,S,1	CMDEL,_CONTACT	FLST,2,5,5,ORDE,5
ESLN,S,0	GPLOT	FITEM,2,1
NSLE,A,CT2 !	CM,_Y,KP	FITEM,2,-2
CZMESH patch (fsk	KSEL, , , ,	FITEM,2,7
qt-40109 8/2008)	9	FITEM,2,11
ESURF	CM,_Y1,KP	FITEM,2,17
ALLSEL	CMSEL,S,_Y	DA,P51X,SYMM
ESEL,ALL	CMSEL,S,_Y1	FLST,2,2,4,ORDE,2
ESEL,S,TYPE,,5	KATT, , , 1,	FITEM,2,8
ESEL,A,TYPE,,6	1, 2, , 0	FITEM,2,-9
ESEL,R,REAL,,4	CMSEL,S,_Y	/GO
ESEL,ALL	CMDELE,_Y	DL,P51X, ,ALL,
ESEL,S,TYPE,,5	CMDELE,_Y1	FLST,2,1,1,ORDE,1
ESEL,A,TYPE,,6	KMESH, , 9	FITEM,2,1951
ESEL,R,REAL,,4	FINISH	/GO
CMSEL,A,_NODECM	/SOL	D,P51X, , , , ,
CMDEL,_NODECM	ANTYPE,4	,UX,UY,ROTX,ROTY,
CMSEL,A,_ELEMCM	TRNOPT,FULL	ROTZ,
CMDEL,_ELEMCM	LUMPM,0	FLST,2,1,1,ORDE,1
CMSEL,S,_KPCM	ANTYPE,4	FITEM,2,1951
CMDEL,_KPCM	NLGEOM,1	IC,P51X,UZ, , -
CMSEL,S,_LINECM	NSUBST,5000,5000,	7000,
CMDEL,_LINECM	5000	SOLVE
CMSEL,S,_AREACM	OUTRES,ERASE	
CMDEL,_AREACM	OUTRES,ALL,5	

Primer model (1mm)

Gràfics representatius del moment final de l'impacte



Gràfica de l'acceleració de la massa

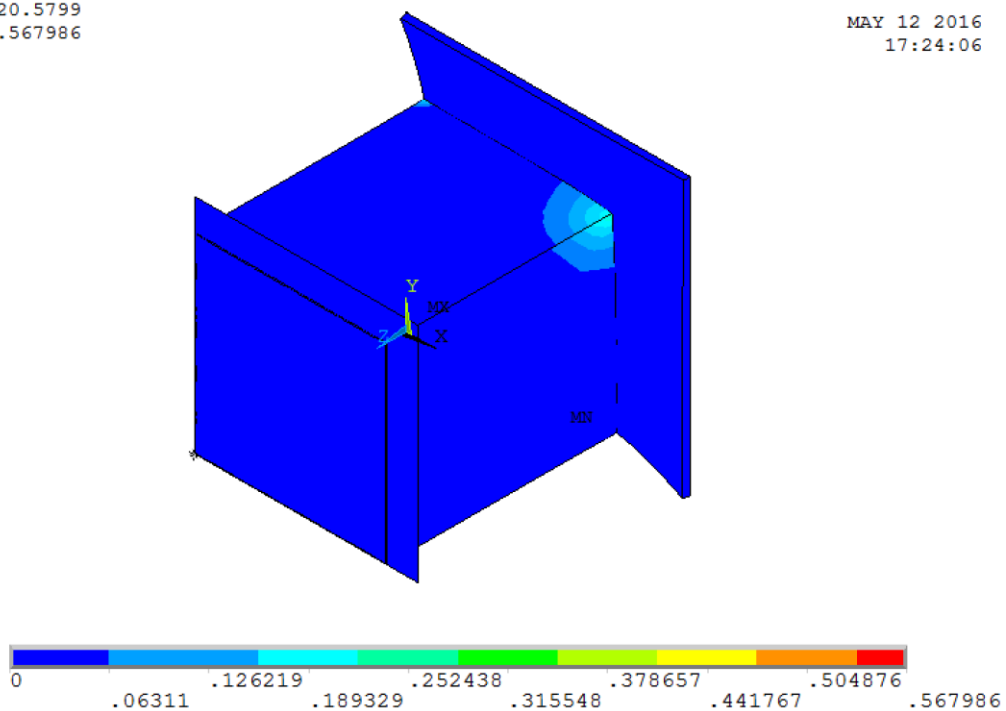


Gràfica de la velocitat de la massa

1
NODAL SOLUTION
TIME=.00344
EPPLEQV (AVG)
DMX =20.5799
SMX =.567986

ANSYS
R15.0
Academic

MAY 12 2016
17:24:06



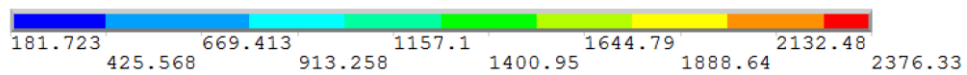
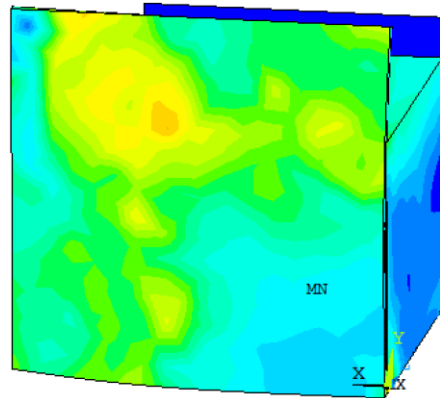
Deformació plàstica del model

1

NODAL SOLUTION
TIME=.00344
SEQV (AVG)
DMX =20.5799
SMN =181.723
SMX =2376.33

ANSYS
R15.0
Academic

MAY 12 2016
17:22:59



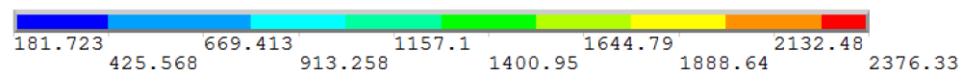
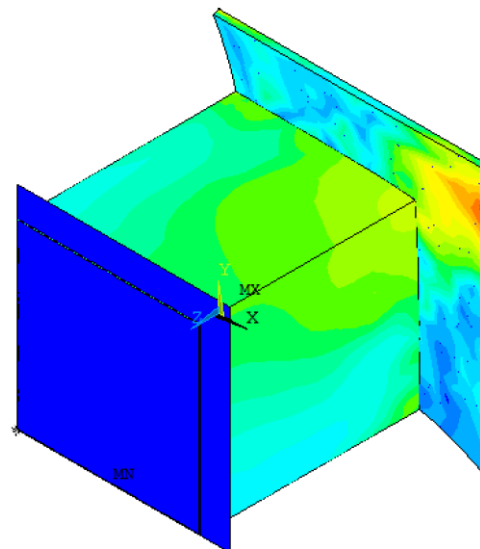
Tensió equivalent de Von Mises

1

NODAL SOLUTION
TIME=.00344
SEQV (AVG)
DMX =20.5799
SMN =181.723
SMX =2376.33

ANSYS
R15.0
Academic

MAY 12 2016
17:21:46



Tensió equivalent de Von Mises

Fitxer de comandes

/BATCH	K,10,125,0,154,	31, 28,
/input,menust,tmp	K,11,0,0,154,	23
, ''	K,12,0,0.5,154,	FLST,2,4,6,ORDE,2
WPSTYLE,,,,,,,,0	K,13,0,0.5,4,	FITEM,2,2
/NOPR	K,14,125,0.5,4,	FITEM,2,-5
KEYW,PR_SET,1	K,15,125,0.5,154,	VGLUE,P51X
KEYW,PR_STRUC,1	K,15,125,0.5,154,	GPLOT
KEYW,PR_THERM,0	V, 11,	K,32,145,145,154,
KEYW,PR_FLUID,0	12, 15,	K,33,0,145,154,
KEYW,PR_ELMAG,0	10, 2,	K,34,145,0,154,
KEYW,MAGNOD,0	13, 14,	K,34,145,0,154,
KEYW,MAGEDG,0	9	FLST,2,4,3
KEYW,MAGHFE,0	K,16,0.5,0.5,154,	FITEM,2,11
KEYW,MAGELC,0	K,17,0.5,0.5,4,	FITEM,2,33
KEYW,PR_MULTI,0	GPLOT	FITEM,2,32
/GO	K,18,0,125,4,	FITEM,2,34
/PREP7	K,19,0.5,125,4,	A,P51X
ET,1,SOLID185	K,20,0.5,125,154,	GPLOT
ET,2,MASS21	K,21,0,125,154,	FLST,5,4,6,ORDE,2
ET,3,MASS21	K,21,0,125,154,	FITEM,5,5
ETDEL,3	V, 16,	FITEM,5,-8
R,1, , ,0.075, ,	12, 21,	CM,_Y,VOLU
, ,	20, 17,	VSEL, , , ,P51X
MPTEMP,,,,,,,,	13, 18,	CM,_Y1,VOLU
MPTEMP,1,0	19	CMSEL,S,_Y
MPDATA,EX,1,,6900	K,22,0.5,124,154,	CMSEL,S,_Y1
0	K,23,0.5,124,4,	VATT, 2,
MPDATA,PRXY,1,,	K,23,125,124,4,	1, 1, 0
MPTEMP,,,,,,,,	GPLOT	CMSEL,S,_Y
MPTEMP,1,0	K,24,0.5,124,4,	CMDELE,_Y
MPDATA,EX,2,,1800	K,25,125,124,154,	CMDELE,_Y1
00	K,26,125,125,154,	FLST,5,4,6,ORDE,2
MPDATA,PRXY,2,,	K,26,125,125,4,	FITEM,5,5
TB,BISO,2,1,2,	K,26,125,125,4,	FITEM,5,-8
TBTEMP,0	K,27,125,124,154,	CM,_Y,VOLU
TBDATA,,1400,1800	K,27,125,124,154,	VSEL, , , ,P51X
, , , ,	K,27,125,125,154,	CM,_Y1,VOLU
K,1,0,0,0,	K,27,125,125,154,	CHKMSH,'VOLU'
K,2,0,0,4,	V, 22,	CMSEL,S,_Y
K,3,185,0,4,	20, 19,	VSWEEP,_Y1
K,4,185,0,0,	24, 25,	CMDELE,_Y
K,5,185,180,0,	27, 26,	CMDELE,_Y1
K,6,185,180,4,	23	CMDELE,_Y2
K,7,0,180,4,	GPLOT	GPLOT
K,8,0,180,0,	K,28,124,124,154,	MSHAPE,1,3D
K,8,0,180,0,	K,28,124,124,4,	MSHKEY,0
V, 2,	K,29,124,124,154,	FLST,5,4,6,ORDE,2
1, 4,	K,30,124,0.5,154,	FITEM,5,5
3, 7,	K,31,124,0.5,4,	FITEM,5,-8
8, 5,	K,31,124,0.5,4,	CM,_Y,VOLU
6	V, 15,	VSEL, , , ,P51X
GPLOT	30, 29,	CM,_Y1,VOLU
GPLOT	25, 14,	CHKMSH,'VOLU'
K,9,125,0,4,		CMSEL,S,_Y

```

VMESH, _Y1
CMDELE, _Y
CMDELE, _Y1
CMDELE, _Y2
CM, _Y, VOLU
VSEL, , , ,
1
CM, _Y1, VOLU
CMSEL, S, _Y
CMSEL, S, _Y1
VATT, , 1,
1, 1, 0
CMSEL, S, _Y
CMDELE, _Y
CMDELE, _Y1
CM, _Y, VOLU
VSEL, , , ,
1
CM, _Y1, VOLU
CMSEL, S, _Y
CMSEL, S, _Y1
VATT, , 1,
1, 1, 0
CMSEL, S, _Y
CMDELE, _Y
CMDELE, _Y1
CM, _Y, VOLU
VSEL, , , ,
1
CM, _Y1, VOLU
CHKMSH, 'VOLU'
CMSEL, S, _Y
VMESH, _Y1
CMDELE, _Y
CMDELE, _Y1
CMDELE, _Y2
CM, _Y, KP
KSEL, , , ,
11
CM, _Y1, KP
CMSEL, S, _Y
CMSEL, S, _Y1
KATT, , 1,
1, 2, 0
CMSEL, S, _Y
CMDELE, _Y
CMDELE, _Y1
KMESH, 11
CM, _NODECM, NODE
CM, _ELEMCM, ELEM
CM, _KPCM, KP
CM, _LINECM, LINE
CM, _AREACM, AREA
CM, _VOLUCM, VOLU
MP, MU, 1,
MAT, 1

```

```

R, 3
REAL, 3
ET, 4, 170
ET, 5, 174
KEYOPT, 5, 9, 0
KEYOPT, 5, 10, 2
R, 3,
RMORE,
RMORE, , 0
RMORE, 0
ASEL, S, , , 7
CM, _TARGET, AREA
AATT, -1, 3, 4, -1
TYPE, 4
AMESH, ALL
TSHAP, PILO
E, 1812
ASEL, S, , , 25
ASEL, A, , , 32
ASEL, A, , , 35
ASEL, A, , , 38
CM, _CONTACT, AREA
TYPE, 5
NSLA, S, 1
ESLN, S, 0
NSLE, A, CT2 !
CZMESH patch (fsk
qt-40109 8/2008)
ESURF
*SET, _REALID, 3
ALLSEL
ESEL, ALL
ESEL, S, TYPE, , 4
ESEL, A, TYPE, , 5
ESEL, R, REAL, , 3
ASEL, S, REAL, , 3
ESEL, ALL
ESEL, S, TYPE, , 4
ESEL, A, TYPE, , 5
ESEL, R, REAL, , 3
ASEL, S, REAL, , 3
CMSEL, A, _NODECM
CMDEL, _NODECM
CMSEL, A, _ELEMCM
CMDEL, _ELEMCM
CMSEL, S, _KPCM
CMDEL, _KPCM
CMSEL, S, _LINECM
CMDEL, _LINECM
CMSEL, S, _AREACM
CMDEL, _AREACM
CMSEL, S, _VOLUCM
CMDEL, _VOLUCM
CMDEL, _TARGET
CMDEL, _CONTACT
CM, _NODECM, NODE

```

```

CM, _ELEMCM, ELEM
CM, _KPCM, KP
CM, _LINECM, LINE
CM, _AREACM, AREA
CM, _VOLUCM, VOLU
MP, MU, 1, 0
MAT, 1
R, 4
REAL, 4
ET, 6, 170
ET, 7, 174
KEYOPT, 7, 9, 0
KEYOPT, 7, 10, 2
R, 4,
RMORE,
RMORE, , 0
RMORE, 0
ASEL, S, , , 5
CM, _TARGET, AREA
TYPE, 6
NSLA, S, 1
ESLN, S, 0
ESLL, U
ESEL, U, ENAME, , 188
, 189
NSLE, A, CT2
ESURF
CMSEL, S, _ELEMCM
ASEL, S, , , 30
ASEL, A, , , 33
ASEL, A, , , 36
ASEL, A, , , 39
CM, _CONTACT, AREA
TYPE, 7
NSLA, S, 1
ESLN, S, 0
NSLE, A, CT2 !
CZMESH patch (fsk
qt-40109 8/2008)
ESURF
ALLSEL
ESEL, ALL
ESEL, S, TYPE, , 6
ESEL, A, TYPE, , 7
ESEL, R, REAL, , 4
ESEL, ALL
ESEL, S, TYPE, , 6
ESEL, A, TYPE, , 7
ESEL, R, REAL, , 4
CMSEL, A, _NODECM
CMDEL, _NODECM
CMSEL, A, _ELEMCM
CMDEL, _ELEMCM
CMSEL, S, _KPCM
CMDEL, _KPCM
CMSEL, S, _LINECM

```

CMDEL, _LINECM
 CMSEL, S, _AREACM
 CMDEL, _AREACM
 CMSEL, S, _VOLUCM
 CMDEL, _VOLUCM
 CMDEL, _TARGET
 CMDEL, _CONTACT
 GPLOT
 FINISH
 /SOL
 ANTYPE, 4
 TRNOPT, FULL
 LUMPM, 0
 ANTYPE, 4
 NLGEOM, 1

NSUBST, 2500, 2500,
 2500
 OUTRES, ERASE
 OUTRES, ALL, 5
 RESCONTRL, DEFINE,
 ALL, 5, 1
 TIME, 0.005
 FLST, 2, 5, 5, ORDE, 5
 FITEM, 2, 1
 FITEM, 2, -2
 FITEM, 2, 8
 FITEM, 2, 11
 FITEM, 2, 15
 DA, P51X, SYMM
 FLST, 2, 2, 4, ORDE, 2
 FITEM, 2, 8

FITEM, 2, -9
 /GO
 DL, P51X, , ALL,
 FLST, 2, 1, 1, ORDE, 1
 FITEM, 2, 1812
 /GO
 D, P51X, , , , ,
 , UX, UY, ROTX, ROTY,
 ROTZ,
 GPLOT
 FLST, 2, 1, 1, ORDE, 1
 FITEM, 2, 1812
 IC, P51X, UZ, , -
 7000,
 SOLVE

Segon model (anàlisi de vinclament de 7 mm)

Fitxer de comandes

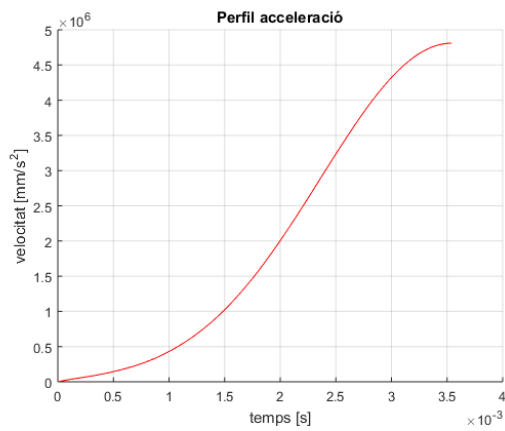
```

/BATCH
/input,menust,tmp
, ''
WPSTYLE,,,,,,,,0
/NOPR
KEYW,PR_SET,1
KEYW,PR_STRUC,1
KEYW,PR_THERM,0
KEYW,PR_FLUID,0
KEYW,PR_ELMAG,0
KEYW,MAGNOD,0
KEYW,MAGEDG,0
KEYW,MAGHFE,0
KEYW,MAGELC,0
KEYW,PR_MULTI,0
/GO
/PREP7
ET,1,SOLID185
MPTEMP,,,,,,,,
MPTEMP,1,0
MPDATA,EX,1,,1800
00
MPDATA,PRXY,1,,0
TB,BISO,1,1,2,
TBTEMP,0
TBDATA,,1400,1800
,,,,
K,1,0,125,0,
K,2,0,118,0,
K,3,0,118,150,
K,4,0,125,150,
K,5,125,125,150,
K,6,125,118,150,
K,7,125,118,0,
K,8,125,125,0,
K,8,125,125,0,
V,3,
4,5,
6,2,
1,8,
7
K,9,118,118,0,
GPLOT
K,10,118,118,150,
K,11,118,0,150,
K,12,125,0,150,
K,13,125,0,0,
K,14,118,0,0,
K,14,118,0,0,
V,7,
9,10,
6,13,
14,11,
12
MSHAPE,1,3D
MSHKEY,0
FLST,5,2,6,ORDE,2
FITEM,5,1
FITEM,5,-2
CM,_Y,VOLU
VSEL,, , ,P51X
CM,_Y1,VOLU
CHKMSH,'VOLU'
CMSEL,S,_Y
VMESH,_Y1
CMDELE,_Y
CMDELE,_Y1
CMDELE,_Y2
FINISH
/SOL
ANTYPE,1
FLST,2,2,5,ORDE,2
FITEM,2,6
FITEM,2,8
/GO
DA,P51X,UZ,
FLST,2,2,5,ORDE,2
FITEM,2,2
FITEM,2,12
DA,P51X,SYMM
FLST,2,2,5,ORDE,2
FITEM,2,1
FITEM,2,10
/GO
SFA,P51X,1,PRES,-
1
finish
/sol
ANTYPE,0
PSTRES,1
SOLVE
FINISH
/SOLU
ANTYPE,1
BUCOPT,LANB,1,0,0
,
SOLVE
FINISH
/POST1
SET,LIST

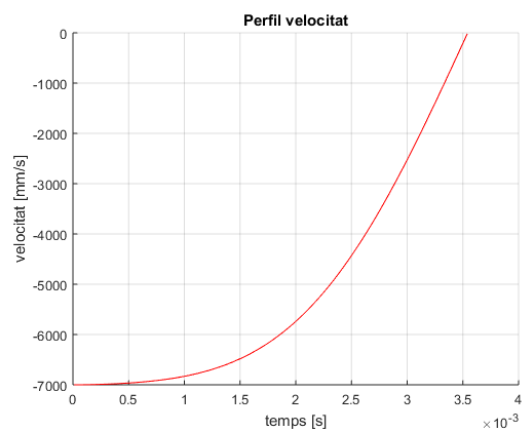
```

Segon model (anàlisi de l'impacte amb 7 mm)

Gràfics representatius del moment final de l'impacte



Gràfica de l'acceleració de la massa

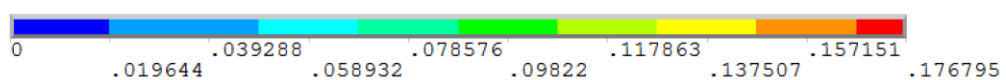
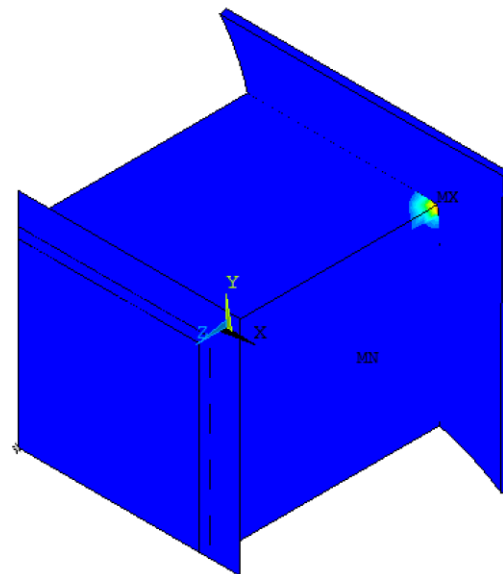


Gràfica de la velocitat de la massa

1
NODAL SOLUTION
TIME=.00355
EPPLEQV (AVG)
DMX =23.0633
SMX =.176795

ANSYS
R15.0
Academic

JUN 8 2016
19:31:20



Deformació plàstica del model

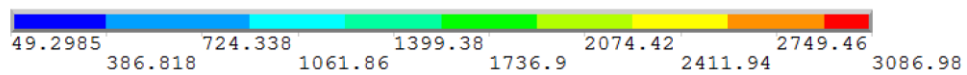
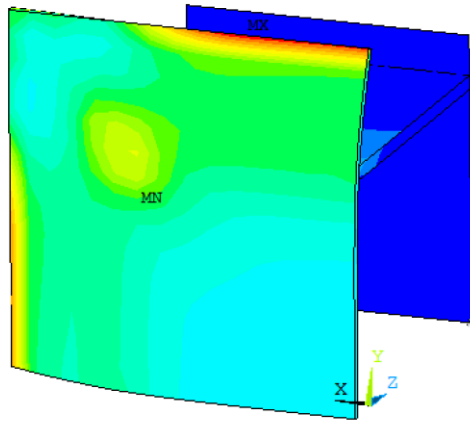
1

NODAL SOLUTION
 TIME=.00355
 SEQV (AVG)
 DMX =23.0633
 SMN =49.2985
 SMX =3086.98

ANSYS
 R15.0

Academic

JUN 8 2016
 19:30:46



Tensió equivalent de Von Mises

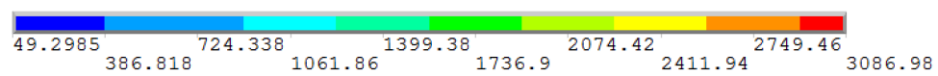
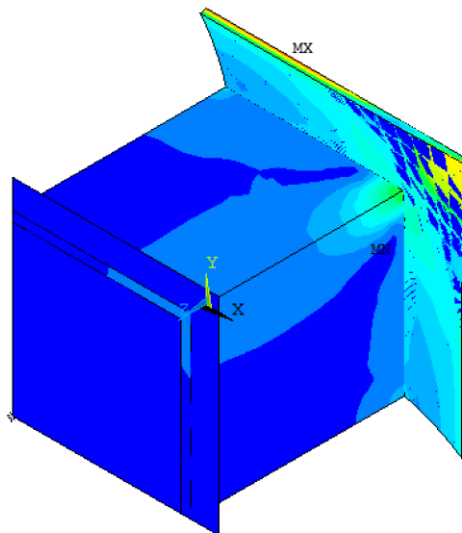
1

NODAL SOLUTION
 TIME=.00355
 SEQV (AVG)
 DMX =23.0633
 SMN =49.2985
 SMX =3086.98

ANSYS
 R15.0

Academic

JUN 8 2016
 19:29:56



Tensió equivalent de Von Mises

Fitxer de comandes

```

/BATCH
/input,menust,tmp
,' '
WPSTYLE,,,,,,,,0
/NOPR
KEYW,PR_SET,1
KEYW,PR_STRUC,1
KEYW,PR_THERM,0
KEYW,PR_FLUID,0
KEYW,PR_ELMAG,0
KEYW,MAGNOD,0
KEYW,MAGEDG,0
KEYW,MAGHFE,0
KEYW,MAGELC,0
KEYW,PR_MULTI,0
/GO
/PREP7
ET,1,SOLID185
ET,2,MASS21
R,1,,,0.075,,
,
MPTEMP,,,,,,,,
MPTEMP,1,0
MPDATA,EX,1,,1800
00
MPDATA,PRXY,1,,0
TB,BISO,1,1,2,
TBTEMP,0
TBDATA,,1400,1800
,,,,
TBDE,BISO,1
MPTEMP,,,,,,,,
MPTEMP,1,0
MPDE,EX,1
MPDE,PRXY,1
MPDATA,EX,1,,6900
0
MPDATA,PRXY,1,,0
TB,BISO,1,1,2,
TBTEMP,0
TBDATA,,1400,1800
,,,,
TBDE,BISO,1
MPTEMP,,,,,,,,
MPTEMP,1,0
MPDATA,EX,2,,1800
00
MPDATA,PRXY,2,,0
TB,BISO,2,1,2,
TBTEMP,0
TBDATA,,1400,1800
,,,,
K,1,0,0,0,
K,2,0,0,4,
K,3,185,0,4,
K,4,185,0,0,
K,5,185,180,0,
K,6,185,180,4,
K,7,0,180,4,
K,8,0,180,0,
K,8,0,180,0,
V,,2,,1,
4,,3,,7,
8,,5,,5
VDELE,,1
FLST,2,6,5,ORDE,2
FITEM,2,1
FITEM,2,-6
ADELE,P51X
FLST,2,11,4,ORDE,
2
FITEM,2,1
FITEM,2,-11
LDELE,P51X
GPLOT
V,,2,,1,
8,,7,,3,
4,,5,,6
K,9,0,125,4,
K,10,0,118,4,
K,11,0,118,154,
K,12,0,125,154,
K,13,125,125,154,
K,14,125,118,154,
K,15,125,118,4,
K,16,125,125,4,
K,16,125,125,4,
V,,11,,12,
9,,10,,14,
13,,16,,15
K,17,118,118,4,
K,18,118,118,154,
K,19,118,0,154,
K,20,125,0,154,
K,21,125,0,4,
K,21,118,0,4,
K,22,125,0,4,
K,22,125,0,4,
V,,20,,19,
18,,14,
22,,21,
17,,15
FLST,5,2,6,ORDE,2
FITEM,5,2
FITEM,5,-3
CM,_Y,VOLU
VSEL,,,,P51X
CM,_Y1,VOLU
CMSEL,S,_Y
CMSEL,S,_Y1
VATT,,2,
1,,1,,0
CMSEL,S,_Y
CMDELE,_Y
CMDELE,_Y1
MSHAPE,1,3D
MSHKEY,0
FLST,5,2,6,ORDE,2
FITEM,5,2
FITEM,5,-3
CM,_Y,VOLU
VSEL,,,,P51X
CM,_Y1,VOLU
CHKMSH,'VOLU'
CMSEL,S,_Y
VMESH,_Y1
CMDELE,_Y
CMDELE,_Y1
CMDELE,_Y2
CM,_Y,VOLU
VSEL,,,,1
CM,_Y1,VOLU
CMSEL,S,_Y
CMSEL,S,_Y1
VATT,,1,
1,,1,,0
CMSEL,S,_Y
CMDELE,_Y
CMDELE,_Y1
MSHAPE,0,3D
MSHKEY,1
CM,_Y,VOLU
VSEL,,,,1
CM,_Y1,VOLU
CHKMSH,'VOLU'
CMSEL,S,_Y
VMESH,_Y1
CMDELE,_Y
CMDELE,_Y1
CMDELE,_Y2
FINISH
/SOL
FINISH
/PREP7
K,23,0,0,154,
K,24,145,0,154,
K,25,145,145,154,
K,26,0,145,154,
K,26,0,145,154,
FLST,2,4,3
FITEM,2,23
FITEM,2,26

```

FITEM,2,25	CM,_LINECM,LINE	CMDEL,_TARGET
FITEM,2,24	CM,_AREACM,AREA	CMDEL,_CONTACT
A,P51X	CM,_VOLUCM,VOLU	CM,_NODECM,NODE
GPLOT	MP,MU,1,	CM,_ELEMCM,ELEM
R,1,0,0,0.075,0,0	MAT,1	CM,_KPCM,KP
,0,	R,3	CM,_LINECM,LINE
CM,_Y,KP	REAL,3	CM,_AREACM,AREA
KSEL,, , , 23	ET,3,170	CM,_VOLUCM,VOLU
CM,_Y1,KP	ET,4,174	MP,MU,1,0
CMSEL,S,_Y	KEYOPT,4,9,0	MAT,1
CMSEL,S,_Y1	KEYOPT,4,10,2	R,4
KATT, 1,	R,3,	REAL,4
1, 2, 0	RMORE,	ET,5,170
CMSEL,S,_Y	RMORE,,0	ET,6,174
CMDELE,_Y	RMORE,0	KEYOPT,6,9,0
CMDELE,_Y1	ASEL,S,,,19	KEYOPT,6,10,2
KMESH, 23	CM,_TARGET,AREA	R,4,
FLST,2,2,6,ORDE,2	AATT,-1,3,3,-1	RMORE,
FITEM,2,2	TYPE,3	RMORE,,0
FITEM,2,-3	AMESH,ALL	RMORE,0
VCLEAR,P51X	TSHAP,PILO	ASEL,S,,,5
GPLOT	E,2160	CM,_TARGET,AREA
FLST,2,2,6,ORDE,2	ASEL,S,,,13	TYPE,5
FITEM,2,2	ASEL,A,,,21	NSLA,S,1
FITEM,2,-3	CM,_CONTACT,AREA	ESLN,S,0
VGLUE,P51X	TYPE,4	ESLL,U
FLST,5,2,6,ORDE,2	NSLA,S,1	ESEL,U,ENAME,,188
FITEM,5,3	ESLN,S,0	,189
FITEM,5,-4	NSLE,A,CT2 !	NSLE,A,CT2
CM,_Y,VOLU	CZMESH patch (fsk	ESURF
VSEL,, , , P51X	qt-40109 8/2008)	CMSEL,S,_ELEMCM
CM,_Y1,VOLU	ESURF	ASEL,S,,,18
CMSEL,S,_Y	*SET,_REALID,3	ASEL,A,,,22
CMSEL,S,_Y1	ALLSEL	CM,_CONTACT,AREA
VATT, 2,	ESEL,ALL	TYPE,6
1, 1, 0	ESEL,S,TYPE,,3	NSLA,S,1
CMSEL,S,_Y	ESEL,A,TYPE,,4	ESLN,S,0
CMDELE,_Y	ESEL,R,REAL,,3	NSLE,A,CT2 !
CMDELE,_Y1	ASEL,S,REAL,,3	CZMESH patch (fsk
MSHAPE,1,3D	ESEL,ALL	qt-40109 8/2008)
MSHKEY,0	ESEL,S,TYPE,,3	ESURF
FLST,5,2,6,ORDE,2	ESEL,A,TYPE,,4	ALLSEL
FITEM,5,3	ESEL,R,REAL,,3	ESEL,ALL
FITEM,5,-4	ASEL,S,REAL,,3	ESEL,S,TYPE,,5
CM,_Y,VOLU	CMSEL,A,_NODECM	ESEL,A,TYPE,,6
VSEL,, , , P51X	CMDEL,_NODECM	ESEL,R,REAL,,4
CM,_Y1,VOLU	CMSEL,A,_ELEMCM	ESEL,ALL
CHKMSH,'VOLU'	CMDEL,_ELEMCM	ESEL,S,TYPE,,5
CMSEL,S,_Y	CMSEL,S,_KPCM	ESEL,A,TYPE,,6
VMESH,_Y1	CMDEL,_KPCM	ESEL,R,REAL,,4
CMDELE,_Y	CMSEL,S,_LINECM	CMSEL,A,_NODECM
CMDELE,_Y1	CMDEL,_LINECM	CMDEL,_NODECM
CMDELE,_Y2	CMSEL,S,_AREACM	CMSEL,A,_ELEMCM
CM,_NODECM,NODE	CMDEL,_AREACM	CMDEL,_ELEMCM
CM,_ELEMCM,ELEM	CMSEL,S,_VOLUCM	CMSEL,S,_KPCM
CM,_KPCM,KP	CMDEL,_VOLUCM	CMDEL,_KPCM


```

CMSEL,S,_LINECM
CMDEL,_LINECM
CMSEL,S,_AREACM
CMDEL,_AREACM
CMSEL,S,_VOLUCM
CMDEL,_VOLUCM
CMDEL,_TARGET
CMDEL,_CONTACT
GPLOT
FINISH
/SOL
ANTYPE,4
TRNOPT,FULL
LUMPM,0
ANTYPE,4
NLGEOM,1
NSUBST,7500,7500,
7500
OUTRES,ERASE
OUTRES,ALL,5
RESCONTRL,DEFINE,
ALL,5,1
TIME,0.015
FLST,2,2,4,ORDE,2
FITEM,2,8
FITEM,2,-9
/GO
DL,P51X,,ALL,
FLST,2,4,5,ORDE,4
FITEM,2,1
FITEM,2,-2
FITEM,2,7
FITEM,2,14
DA,P51X,SYMM
FLST,2,1,1,ORDE,1
FITEM,2,2160
/GO
D,P51X,, , , , ,
,UX,UY,ROTX,ROTY,
ROTZ,
GPLOT
FLST,2,1,1,ORDE,1
FITEM,2,2160
IC,P51X,UZ,, , -
7000,
solve

```